MODULES TECCART

Communications

D. Bensoussan

LES ANTENNES

dunod

MODULES TECCART

Communications

D. Bensoussan

Professeur à l'Institut Teccart

LES ANTENNES

dunod

« Modules TECCART »

Série « COMMUNICATIONS » (D. Bensoussan)

Les antennes
La modulation
Principes et modes
Émetteurs et récepteurs
Principe, propriétés, fonctions
Reproduire le son
Microphones et haut-parleurs

Série « SEMI-CONDUCTEURS » (V. Ramirez)

Physique des semi-conducteurs
Les résistances non linéaires
à semi-conducteurs
Les diodes modernes
De la théorie à l'utilisation

La publication de cet ouvrage a été encouragée par une subvention accordée au titre de la coopération franco-québécoise.

© TECCART, Montréal, 1980 (fascicules)
© BORDAS, Paris, 1980
ISBN 2-04-012084-X

" Toute représentation ou reproduction, intégrale ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants-droit, ou ayants-cause, est illicite (loi du 11 mars 1957, alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal. La loi du 11 mars 1957 n'autorise, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, que les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective d'une part, et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration "

INTRODUCTION

La première moitié du XIXe siècle a vu naître la télégraphie, puis la téléphonie ; l'invention de la télégraphie sans fil, en 1897, a donné une formidable impulsion à la communication au moyen d'ondes : que ce soit la radio, la télévision ou les transmissions par satellites. Les développements en télémesure ou en télécommande ont également, de pair avec les nouvelles techniques électroniques, permis des performances encore inimaginables au début de ce siècle.

Les antennes, comme moyens d'émission et de réception d'ondes, sont les outils de ces évolutions. Elles existent dans une impressionnante variété de formes et de dimensions, selon les fréquences utilisées ou l'usage qui doit en être fait. Leurs mécanismes de rayonnement ainsi que leurs diverses caractéristiques vont être présentés dans cet ouvrage, avec, en complément, quelques remarques sur leur installation. Le développement de la télédistribution laisse prévoir une grande extension d'équipements d'antennes, notamment collectives.

BIBLIOGRAPHIE

A.R.R.L. (American Radio Relay League), *The A.R.R.L. Antenna book ,*
The radio amateur's handbook.

F.R. Connor, *Antennas*, Arnold.

M. Jouguet, *Ondes électromagnétiques*, Dunod.
Fasc. 1 : *Propagation libre.*
Fasc. 2 : *Propagation guidée.*

M. Mathieu, *Télécommunications par faisceau hertzien,* Dunod.

S. Ramo, J.R. Whinnery, T. Van Duzer, *Fields and waves in communication electronics*, J. Whiley.

L. Thourel, *Les antennes*, Dunod.

TABLE DES MATIÈRES

1. LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

A - CONSIDERATIONS GENERALES 1

1. Définition d'une onde électromagnétique 1

2. Propriétés optiques de l'onde électromagnétique. 3

3. Caractéristiques d'une onde électromagnétique 7

a) puissance de rayonnement. 7

b) polarisation d'une onde. 8

c) fréquence et longueur d'onde 10

4. Le spectre des ondes électromagnétiques. 11

5. Les bruits dans les communications. 14

6. Effets accompagnant les rayonnements électromagnétiques 17

B - MODES DE PROPAGATION D'ONDES HERTZIENNES. 18

1. Les ondes de surface 18

2. La transmission par réflexion ionosphérique 19

3. Les ondes d'espace 26

4. La dispersion troposphérique 27

5. Les fréquences appropriées aux différents modes de propagation . . 28

6. L'attribution internationale des fréquences d'ondes hertziennes . . . 29

2. LES ANTENNES

A - PRINCIPE DES ANTENNES. 33

1. Généralités 34

2. L'antenne résonnante 40

3. Effets du sol 43

4. Alimentation d'une antenne 47

a) alimentation directe 47

b) lignes de transmission parallèles 48

c) lignes en delta 49

d) simple conducteur. 50

e) câbles coaxiaux 50

f) guides d'ondes. 50

B - PARAMETRES D'UNE ANTENNE. 51

1. Résistance d'antenne. 51

2. Coefficient d'efficacité d'une antenne. 51

3. Impédance d'une antenne 53

4. Bande passante 55

5. Largeur de faisceau 56

6. Gain de directivité. 56

7. Gain de puissance 58

8. Longueur effective 58

9. Hauteur effective. 61

10. Récapitulation des propriétés des paramètres d'antenne 62

C - DIFFERENTS MODELES D'ANTENNES. 67

1. Le dipôle replié et ses variantes 67

2. Les groupements d'antennes 71

a) l'antenne colinéaire 71

b) le groupement d'antennes parallèles 72

c) le groupement d'antennes alimentées en quadrature 75

3. Antennes avec éléments passifs — Antenne Yagi 76

a) l'élément réflecteur 76

b) l'élément directeur 77

c) longueurs effectives des réflecteurs et directeurs. 77

d) antennes Yagi 80

4. L'antenne rhombique 84

5. Antennes pour hyperfréquences 87

a) l'antenne à écran réflecteur paraboloïde 87

b) l'antenne à cornet 92

c) l'antenne à lentille. 93

6. Antennes spéciales. 95

a) l'antenne hélicoïdale 95

b) l'antenne discône. 97

c) l'antenne log-périodique 97

d) l'antenne à boucle 99

7. Antennes utilisées selon les fréquences 102

D - INSTALLATION D'UNE ANTENNE (radio ou TV) 103

1. Considérations techniques

a) exemple de choix d'antennes. 103

b) choix de la ligne de transmission 104

— le câble bifilaire plat 105

— le câble coaxial 106

2. Considérations mécaniques 106

3. Les antennes collectives. 111

4. Les antennes intérieures 114

Appendice I : La théorie des champs 115

Appendice II : Les lois de Maxwell 120

Appendice III : Calculs relatifs aux antennes 123

Appendice IV : Portée d'une antenne 128

Questionnaires et réponses 131

Lexique 150

1. LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Les ondes électromagnétiques se rattachent à des phénomènes électriques et magnétiques. Elles sont caractérisées par la présence de deux champs variables; l'un électrique, l'autre magnétique. La notion de champ désigne toute région de l'espace dans laquelle se manifeste l'action de certaines forces: électriques dans le cas d'un champ électrique, magnétiques dans le cas d'un champ magnétique.

Maxwell étudia les rapports entre les deux champs, établissant des équations connues sous le nom d'équations de Maxwell; nous ne présenterons pas ces équations vu leur complexité. Nous nous contenterons d'exposer certains résultats ou phénomènes associés à la théorie des ondes électromagnétiques.

A - CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

1. DEFINITION D'UNE ONDE ELECTROMAGNETIQUE

La présence d'un champ électrique et d'un champ magnétique perpendiculaires l'un à l'autre, et variant dans le temps, produit une onde électromagnétique se déplaçant à la vitesse de la lumière ($c = 3.10^8$ m/s), dans une direction perpendiculaire à celle des lignes de champ électriques et magnétiques.

La figure 1.1 présente les directions relatives des lignes de champ et du sens de propagation de l'onde électromagnétique appropriées. Si l'une des lignes de champ change de sens, la direction de propagation est inversée.

Nous considérerons les champs électriques et magnétiques comme variant sinusoïdalement en fonction du temps.

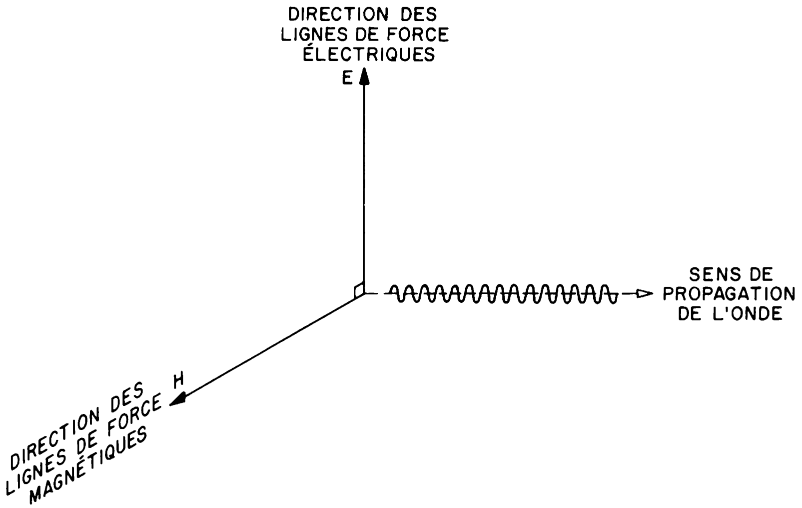


Fig. 1.1. Les directions relatives des lignes de force magnétiques et électriques et du sens de propagation de l'onde qui en résulte.

Dans le système d'axes (x, y, z,) représenté à la figure 1.2, le champ électrique Ex varie dans le plan)z, x), le champ magnétique Hy varie dans le plan (y, z) et l'onde se déplace le long de l'axe z.

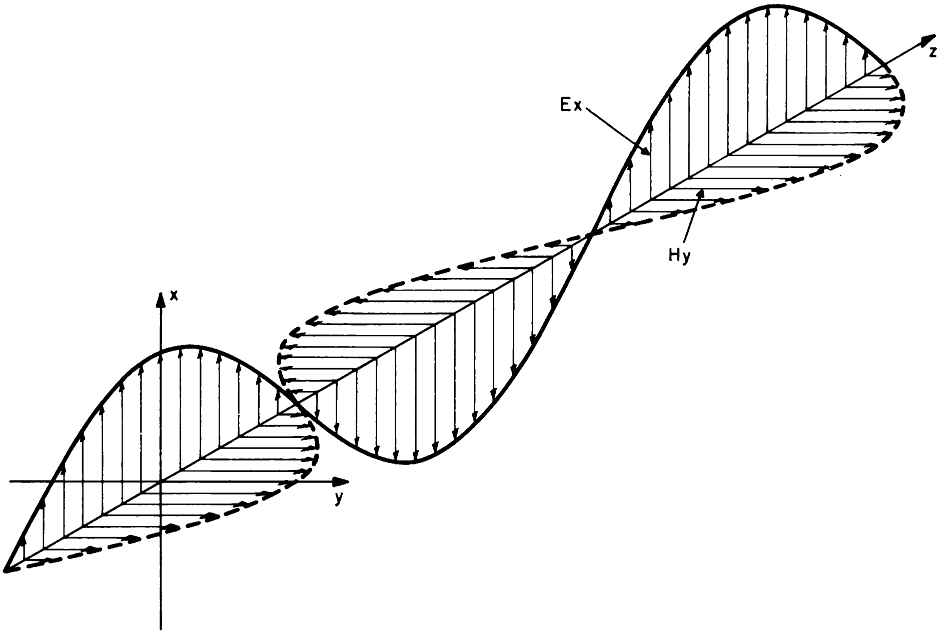


Fig. 1.2. Les composants électrique et magnétique d'une onde électromagnétique varient en fonction du temps dans des plans déterminés.

Les champs électrique et magnétique s'annulent en certains moments, sont plus intenses à d'autres moments; lorsqu'une onde se propage dans l'espace, les points d'intensité de champ nulle ou maximale semblent se déplacer et c'est pourquoi l'on parlera de *front d'ondes.*

2. PROPRIETES OPTIQUES D'UNE ONDE ELECTROMAGNETIQUE

L'onde électromagnétique se propage en ligne droite dans un milieu homogène; sa vitesse est c, soit 3.10^8 m/s dans l'espace ou

$$v = \frac{c}{n} \quad (1\text{-}1)$$

dans un milieu autre que l'espace et dont l'indice de réfraction est n. Dans l'atmosphère, l'indice de réfraction est proche de 1 et nous pourrons supposer constante la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique, et égale à c.

Néanmoins, des changements d'humidité dans l'atmosphère pourraient faire bifurquer l'onde électromagnétique et ce, du fait que l'onde électromagnétique possède les propriétés optiques suivantes: réflexion, réfraction et diffraction. Il y a *réflexion* lorsque l'onde électromagnétique touche le sol ou un objet métallique: l'angle d'incidence i que fait l'onde avec la normale au sol est égal à l'angle de réflexion r que fait l'onde réfléchie avec la normale au sol: (voir figure 1.3)

$$i = r \quad (1\text{-}2)$$

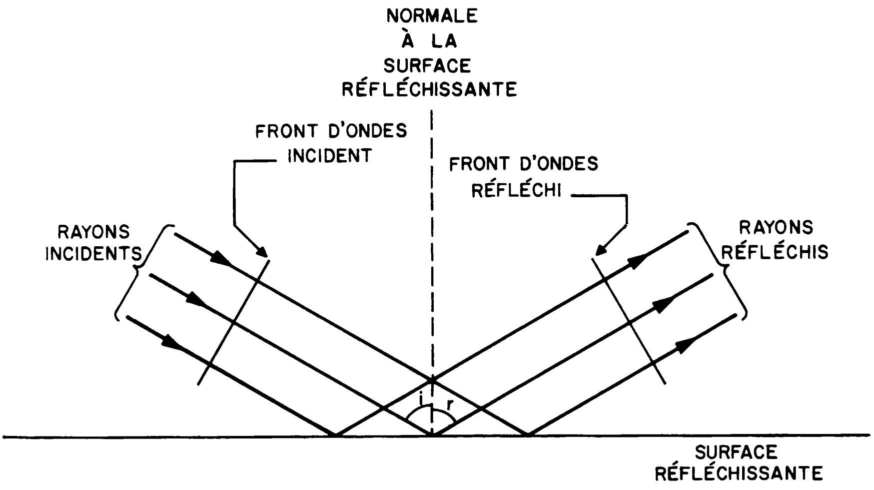


Fig. 1.3. Réflexion d'ondes.

Il y a *réfraction* lorsque l'onde électromagnétique passe d'un milieu à un autre dont l'indice de réfraction est sensiblement le même (figure 1.4). Ainsi, lorsque l'onde passe de l'air à l'eau ou par différents niveaux atmosphériques, on a un phénomène de réfraction. En fait, énergétiquement parlant, une partie de l'onde incidente est réfléchie, une autre réfractée.

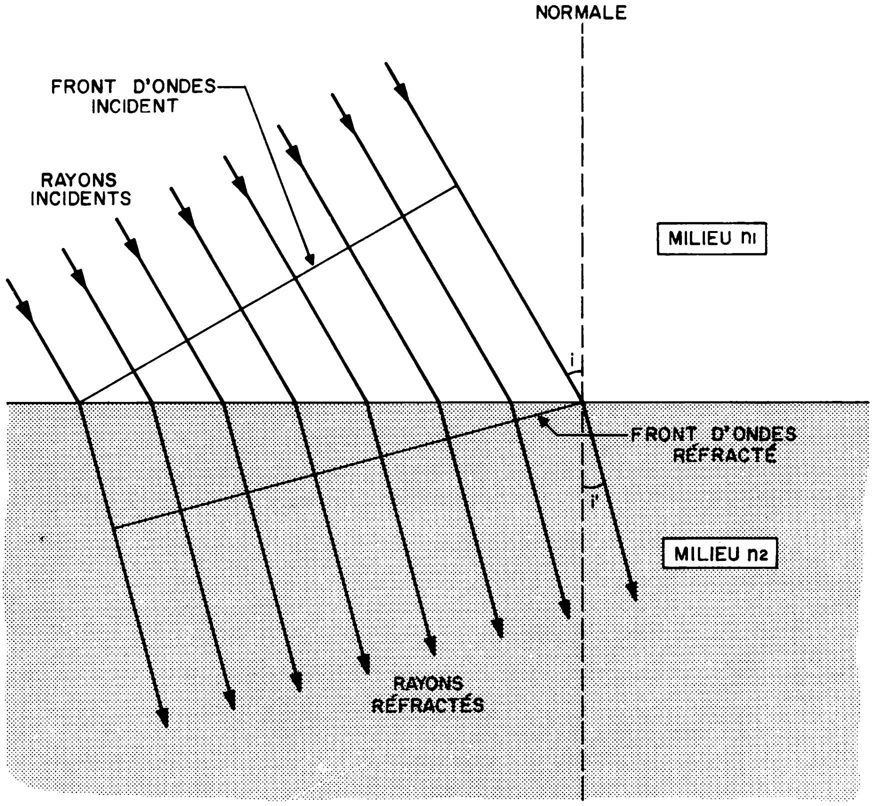


Fig. 1.4. Rayons réfractés ($n_1 < n_2$).

La loi de Snell précise que le rapport des sinus des angles d'incidence et de réfraction est égal à l'inverse du rapport des indices de réfraction des milieux d'incidence et de réfraction.

Définissant les angles comme précédemment, c'est-à-dire par rapport à la normale à la surface de séparation des milieux, nous obtenons:

$$\frac{\sin i}{\sin i'} = \frac{n_2}{n_1} \tag{1-3}$$

EXEMPLE:

Un rayon de lumière pénètre dans l'eau dont l'indice de réfraction est n = 1,33 avec un angle d'incidence de 30°; quel sera l'angle de réfraction ?

Appliquant la formule précédente (1.3), nous obtenons:

$$\frac{\sin 30°}{\sin i'} = \frac{1,33}{1}$$

$$\sin i' = \frac{\sin 30°}{1,33} = \frac{0,5}{1,33} = 0,37$$

correspondant à un angle de réfraction de 22°.

Un rayon de lumière qui serait émis à partir de l'eau en formant un angle d'incidence de 30° avec la surface de celle-ci, pénétrerait dans l'air selon un angle de réfraction i' tel que:

$$\frac{\sin 30°}{\sin i'} = \frac{1}{1,33}$$

$$\sin i' = 1,33 \times \sin 30° = 1,33 \times 0,5 = 0,66$$

soit un angle de 41°.

Il s'ensuit que l'angle de réfraction est toujours inférieur à l'angle d'incidence lorsque l'on passe d'un milieu d'indice de réfraction plus faible à un milieu d'indice de réfraction plus fort: c'est le cas d'une onde passant de l'air à l'eau.

Dans le cas où n_1 est supérieur à n_2, l'angle de réfraction est supérieur à l'angle d'incidence: par conséquent, il existe un angle d'incidence limite pour lequel la réfraction est parallèle à la surface de séparation des milieux; pour un angle d'incidence supérieur à cet angle limite, souvent nommé *angle limite,* il n'y a plus réfraction, mais totale réflexion.

La figure 1.5 présente plusieurs cas possibles:

- onde d'incidence normale au milieu de séparation (a)
- onde incidente faisant un angle d'incidence:
  - inférieur à l'angle limite (b)
  - égal à l'angle limite (c)
  - supérieur à l'angle limite (d)

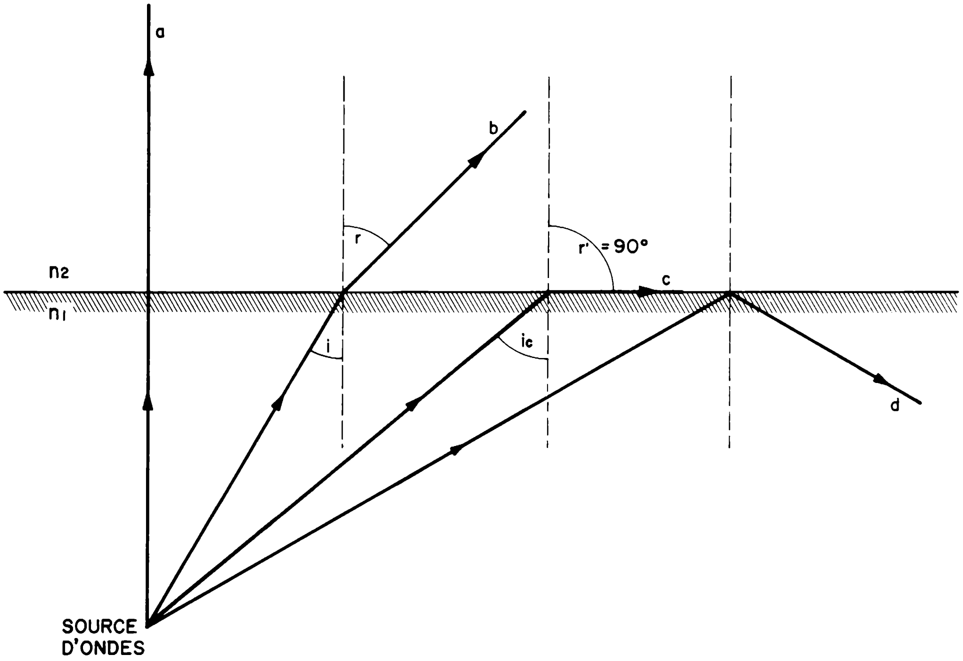


Fig. 1.5. Réfraction et réflexion se produisent selon l'angle d'incidence de l'onde ($n_1 > n_2$).

EXEMPLE:

L'angle limite pour une onde incidente émise à partir de l'eau vers l'air est:

$$\frac{\sin i_c}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{1{,}33} = 0{,}75$$

$$\sin i_c = 0{,}75 \times \sin 90^\circ$$

$$\sin i_c = 0{,}75$$

correspondant à la valeur d'angle limite de 48°

Il y a *diffraction* lorsqu'un front d'onde rencontre un obstacle qui ne comporte qu'un infime orifice: nous pourrions nous attendre à ce que l'onde passant par l'orifice continue en ligne droite mais, en fait, l'onde se disperse dans toutes les directions comme le montre la figure 1.6.

Huygens expliqua ce phénomène en déduisant que chaque point d'une onde électromagnétique peut être considéré comme une source d'ondes se propageant dans toutes les directions; le fait qu'un front d'ondes se déplace quand même dans une seule direction provient de ce que toutes les sources d'ondes secondaires s'annulent entre elles sauf dans la direction de l'onde déterminée par la source originale.

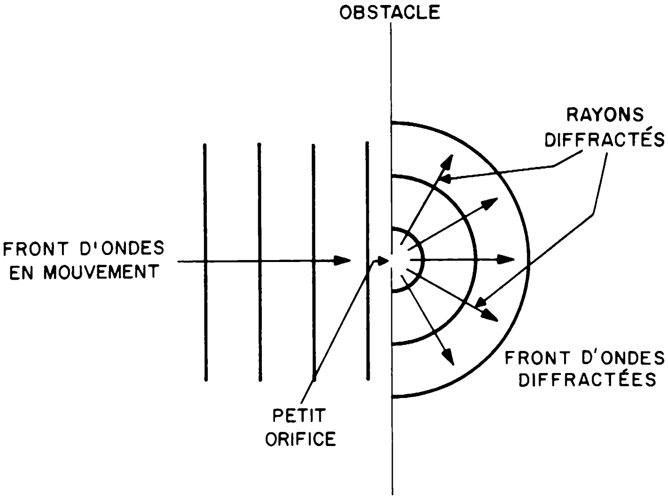


Fig. 1.6. Diffraction.

Un autre phénomène associé aux phénomènes ondulatoires est celui de l'*interférence* lorsque deux sources identiques rayonnent dans un endroit déterminé: du fait de la variation sinusoïdale des champs électriques et magnétiques, l'addition de deux ondes peut se renforcer ou s'atténuer, voire s'annuler selon qu'elles sont en phase, en décalage de phase ou en opposition de phase. D'où la présence de zones où l'onde est inexistante et à celle de zones où l'onde est renforcée. Ces *franges* auront leur importance dans les ondes à haute fréquence.

3. CARACTERISTIQUES D'UNE ONDE ELECTROMAGNETIQUE

L'onde électromagnétique peut être caractérisée par sa puissance, sa polarisation et sa fréquence.

a) Puissance de rayonnement d'une onde:

L'onde électromagnétique est une forme d'énergie, l'énergie de rayonnement, qui est d'autant plus forte que les intensités des champs électriques et magnétiques sont grandes. Il est courant de parler de la *puissance de rayonnement* émise par une source et de la densité de puissance existant autour de la source.

L'expérience montre qu'une source d'ondes S, de puissance de rayonnement P_t, émettant uniformément dans toutes les directions de l'espace, distribuera à une distance r une densité de puissance p_r telle que:

$$p_r = \frac{P_t}{4\pi r^2} \qquad (1\text{-}4)$$

ce qui équivaut à dire que l'énergie de rayonnement est également distribuée sur une sphère virtuelle dont le centre est la source S elle-même. Cette énergie décroît avec la distance; cette variation est représentée à la figure 1.7.

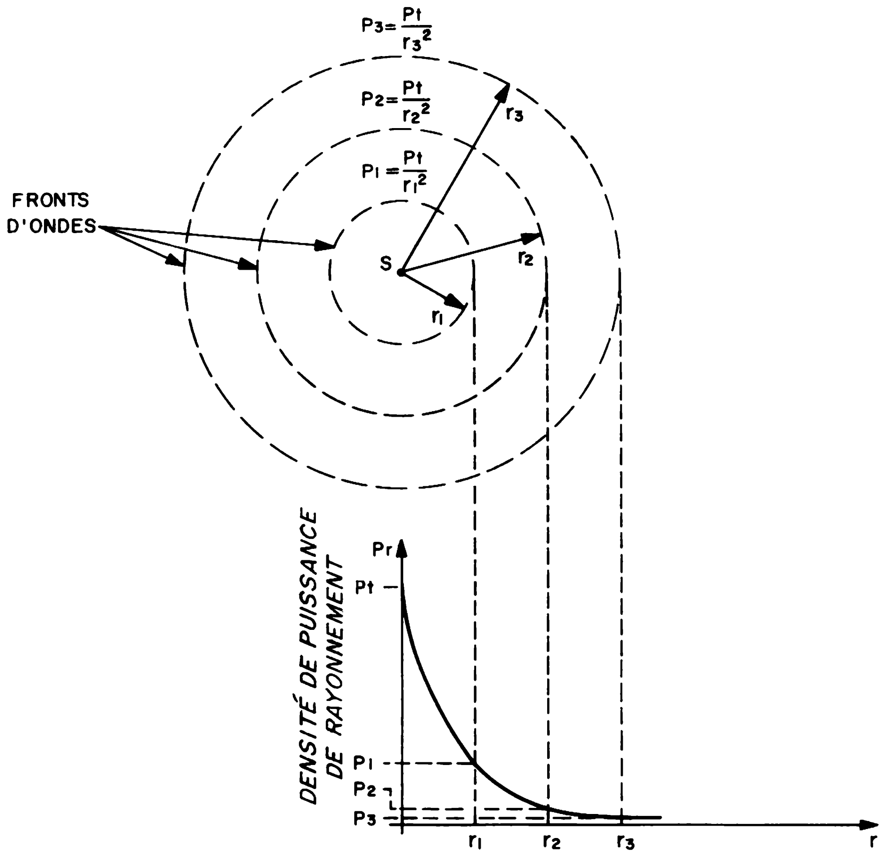


Fig. 1.7. Décroissance de la densité de puissance en fonction de la distance à la source de rayonnement.

b) Polarisation d'une onde:

Les ondes électromagnétiques sont polarisées en ce sens que, dans un milieu donné, les oscillations des champs électrique et magnétique se produisent chacune dans un plan déterminé. La *polarisation* d'une onde est le plan dans lequel varie le champ électrique. Certaines émissions d'ondes électromagnétiques se font à polarisation horizontale, d'autres à polarisation verticale ou même circulaire ou elliptique: ces deux derniers cas sont présents lorsque l'on fait varier le champ électrique dans les plans horizontal puis vertical, alternativement.

Dans le cas d'une polarisation circulaire, il faudrait faire varier un champ électrique d'intensité constante, comme l'indique la figure 1.8.

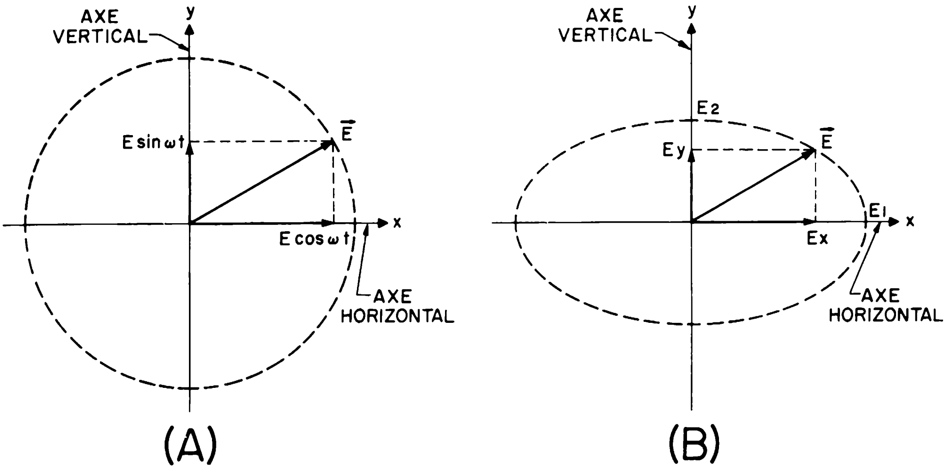


Fig. 1.8. Les composantes horizontales et verticales de la polarisation d'une onde polarisée (a) circulairement, (b) elliptiquement.

Les composantes horizontales et verticales du champ électrique $\vec{E}$ sont respectivement E cos ωt et E sin ωt, ω étant la pulsation à laquelle le champ électrique évolue.

De même, les composantes horizontales et verticales d'une onde à polarisation elliptique seront respectivement E_1 cos ωt, et E_2 sin ωt.

En effet, la résultante des champs horizontaux et verticaux, dont nous désignerons l'intensité par E_x et E_y, répond bien aux coordonnées d'une ellipse donnée sous la forme canonique:

$$\frac{E_x^2}{E_1^2} + \frac{E_y^2}{E_2^2} = 1$$

et dont E_1 et E_2 sont les axes. Au contraire, la résultante des composantes verticale et horizontale de champ électrique dans le cas d'une polarisation circulaire répond à la représentation d'un cercle donné par:

$$E_x^2 + E_y^2 = E^2$$

et dont la grandeur E serait le rayon.

Une onde incidente au sol est réfléchie en polarisation inverse; la réflexion d'ondes électromagnétiques sur des objets sphériques ou des gouttes d'eau s'accompagne d'un changement du sens de polarisation dans le cas de polarisation circulaire ou conique; cette dernière propriété permet, au moyen de techniques radar, d'identifier certains objets réfléchissants baignant dans le brouillard — c'est le cas d'un avion — ou dans l'eau — et c'est le cas d'un bateau.

c) Fréquence et longueur d'onde:

Les ondes électromagnétiques sont désignées par leur *fréquence* ou leur *longueur d'onde*.

La fréquence d'une onde électromagnétique est la fréquence des champs électrique et magnétique qui la composent, soit le nombre de cycles par seconde exécutés par le champ électrique ou magnétique. (1 cycle par seconde correspond à 1 Hertz ou 1 Hz.) Les quelques exemples qui suivent illustrent la notion de fréquence: désignant par f la fréquence, nous aurons (figure 1.9):

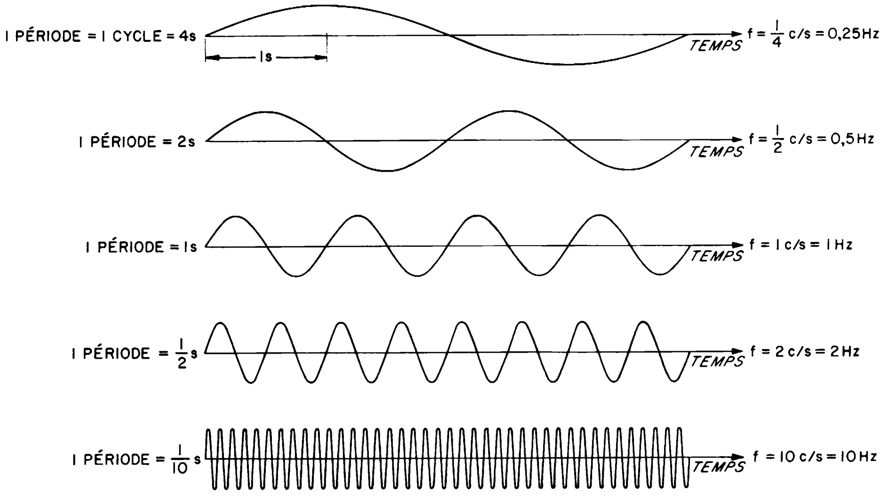


Fig. 1.9. Fréquence et période d'une onde.

La longueur d'onde λ est définie comme le trajet parcouru par une onde après une période d'oscillation T. Dans le cas des ondes électromagnétiques, la vitesse de propagation étant constante et égale à c, la longueur d'onde sera:

$$\lambda = cT \tag{1-5}$$

La fréquence étant le nombre d'oscillations par seconde, nous aurons:

$$f = \frac{1}{T} \tag{1-6}$$

et

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{1-7}$$

Remarquons que les longueurs d'ondes courtes correspondent à des hautes fréquences et inversement.

Par exemple, France Inter émet en modulation d'amplitude (AM) sur la fréquence de 164 kHz correspondant à:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.10^8}{164.10^3} = 1829 \text{ m}$$

Les émissions de télévision du canal 4 (France) se font dans des fréquences variant de 53 à 67 MHz, soit des longueurs d'onde variant de:

$$\lambda = \frac{3.10^8}{53.10^6} = 5{,}66 \text{ m} \quad \text{à} \quad \lambda = \frac{3.10^8}{67.10^6} = 4{,}47 \text{ m}$$

Les émissions en modulation de fréquence (FM) s'effectuent à 100,7 MHz, par exemple, soit:

$$\lambda = \frac{3.10^8}{100{,}7.10^6} = 2{,}97 \text{ mètres}$$

La lumière est aussi une onde électromagnétique dont la longueur d'onde varie de 0,4 à 0,7 micromètre (1 micromètre = 10^{-6} m) selon les couleurs (figure 1.10). Les ondes électromagnétiques n'appartenant pas à ce domaine de longueur d'ondes existent, mais ne sont pas visibles car l'oeil humain n'y est point sensible.

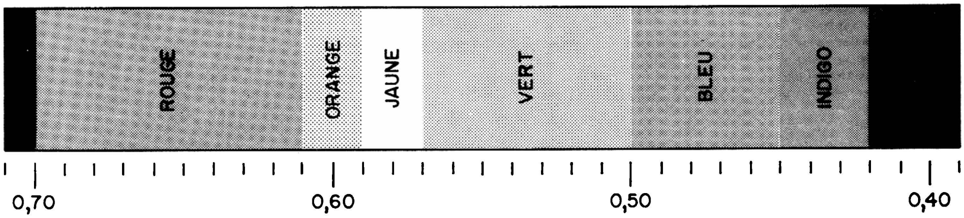


Fig. 1.10. Spectre visible en micromètres.

4. LE SPECTRE DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES

Le spectre des ondes électromagnétiques est divisé en plusieurs groupes dont les domaines de fréquence ou de longueur d'onde sont indiqués au Tableau 1. Les ondes électriques, les ondes hertziennes, les rayons infrarouges, les rayons ultra-violets, les rayons X, les rayons gamma et les rayons cosmiques.

Les ondes hertziennes sont les ondes utilisées en communication: elles sont elles-mêmes divisées en groupes dénommés communément VLF, LF, MF, HF, VHF, UHF, SHF, EHF, ainsi que le présente le Tableau 2.

TABLEAU I

SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

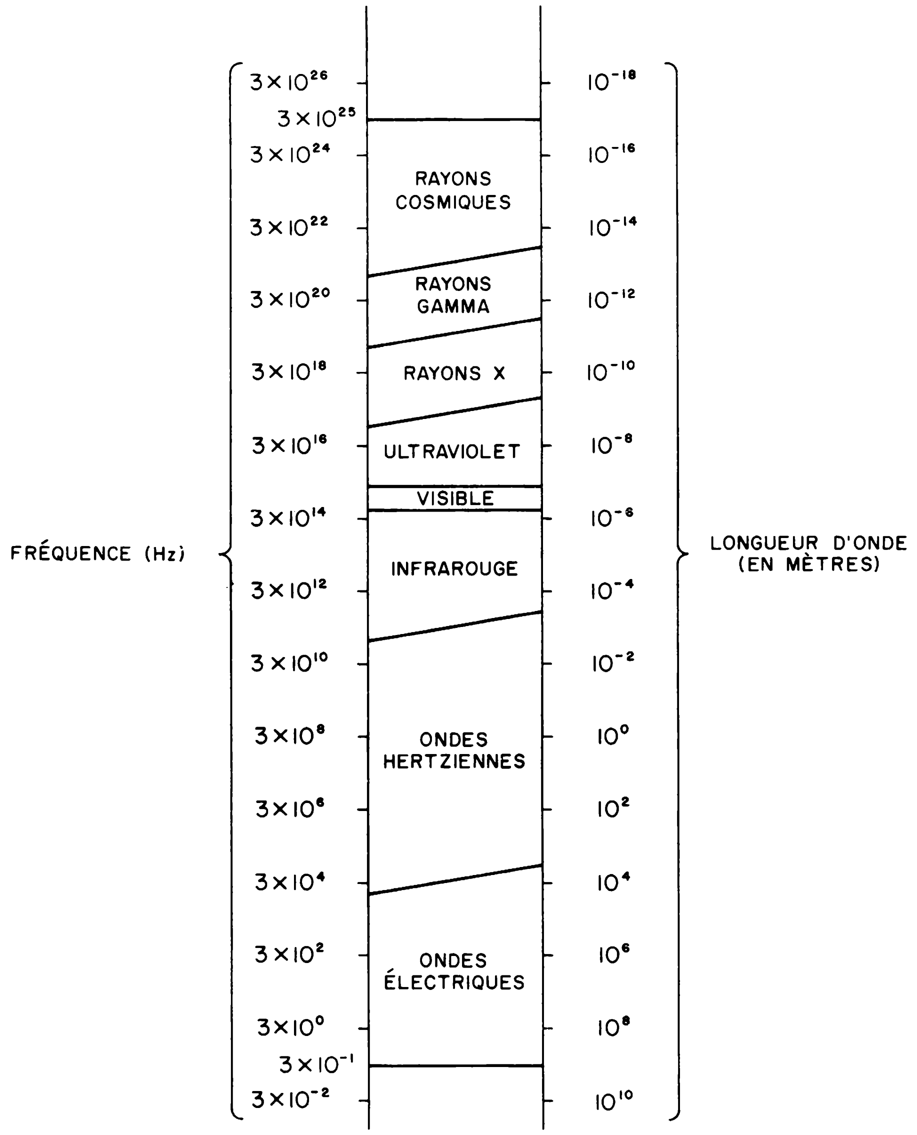


TABLEAU 2

SPECTRE DES ONDES HERTZIENNES

FRÉQUENCE	LONGUEUR D'ONDE	DÉSIGNATION MÉTRIQUE	DÉSIGNATION COURANTE	ABRÉVIATION INTERNATIONALE
10 kHz à 30 kHz	30 km à 10 km	ONDES MYRIAMÉTRIQUES	TRÈS BASSES FRÉQUENCES Very Low Frequencies	VLF
30 kHz à 300 kHz	10 km à 1 km	ONDES KILOMÉTRIQUES	BASSES FRÉQUENCES Low Frequencies	LF
300 kHz à 3 MHz	1 km à 100 m	ONDES HECTOMÉTRIQUES	FRÉQUENCES MOYENNES Medium Frequencies	MF
3 MHz à 30 MHz	100 m à 10 m	ONDES DECAMÉTRIQUES	HAUTES FRÉQUENCES High Frequencies	HF
30 MHz à 300 MHz	10 m à l m	ONDES MÉTRIQUES	TRÈS HAUTES FRÉQUENCES Very High Frequencies	VHF
300 MHz à 3 GHz	l m à 10 cm	ONDES DÉCIMÉTRIQUES	FRÉQUENCES ULTRA HAUTES Ultra High Frequencies	UHF
3 GHz à 30 GHz	10 cm à 1 cm	ONDES CENTIMÉTRIQUES	HYPERFRÉQUENCES Super High Frequencies	SHF
30 GHz à 300 GHz	1 cm à 1 mm	ONDES MILLIMÉTRIQUES	Extremely High Frequencies	EHF

Il serait bon de noter que les ondes électromagnétiques sont en général incohérentes, c'est-à-dire qu'elles résultent de la combinaison de diverses sources mélangées au hasard, provoquant par conséquent une dispersion des ondes. Des techniques spéciales permettent de créer des faisceaux d'ondes en phase et d'une longueur d'onde rigoureusement définie; ces faisceaux sont dotés d'une grande concentration et sont très puissants: ce sont les masers pour les ondes micrométriques et les lasers pour les longueurs d'ondes lumineuses.

5. LES BRUITS DANS LES COMMUNICATIONS

Les émissions électromagnétiques s'accompagnent toujours de parasites ou bruits et sont, de ce fait, perturbées, voire brouillées. En fait, l'un des principaux problèmes que l'électronicien doit surmonter est celui des bruits.

Les bruits électromagnétiques sont des ondes dont on ne peut prédire la fréquence ou même le moment d'apparition; ils se mêlent aux émissions électromagnétiques dont ils limitent la portée: leur puissance est en général faible et, lorsque la puissance de rayonnement de l'émission — qui, rappelons-le, décroît avec la distance de la source émettrice — est de l'ordre de grandeur de celle des bruits, l'émission n'est plus détectable.

L'origine des bruits électromagnétiques est diverse: cosmique, atmosphérique ou appareillage électrique; il existe d'autres bruits, les bruits électriques qui sont d'incontrôlables courants de faible intensité, de fréquences et d'amplitudes diverses et qui se retrouvent dans tout circuit électrique.

Les *bruits cosmiques* sont des rayonnements provenant de diverses étoiles galactiques ou extra-galactiques. Le soleil émet des bruits non négligeables, surtout lors d'orages solaires pouvant durer de quelques secondes à quelques jours.

Les *bruits atmosphériques* proviennent des éclairs: il y a en moyenne près de cent éclairs par seconde sur la terre et la présence des bruits dépend donc des saisons et de la géographie; ces bruits perturbent les émissions en ondes courtes et en ondes moyennes; ils sont négligeables au-dessus de 50 MHz.

Les *bruits des appareillages électriques* sont dus principalement aux allumages d'automobiles, aux lumières fluorescentes et aux moteurs électriques de grande puissance; la fréquence de ces bruits n'atteint pas les fréquences radar.

Les *précipitations statiques* sont des particules chargées qui se déposent après la pluie ou la neige; ces poussières se déposent près de l'antenne de réception; on y remédie en éloignant les objets pointus à proximité des antennes. Les objets pointus ont la faculté d'attirer les charges.

La figure 1.11 représente l'influence relative des différents bruits atmosphériques ainsi que celle d'un récepteur type.

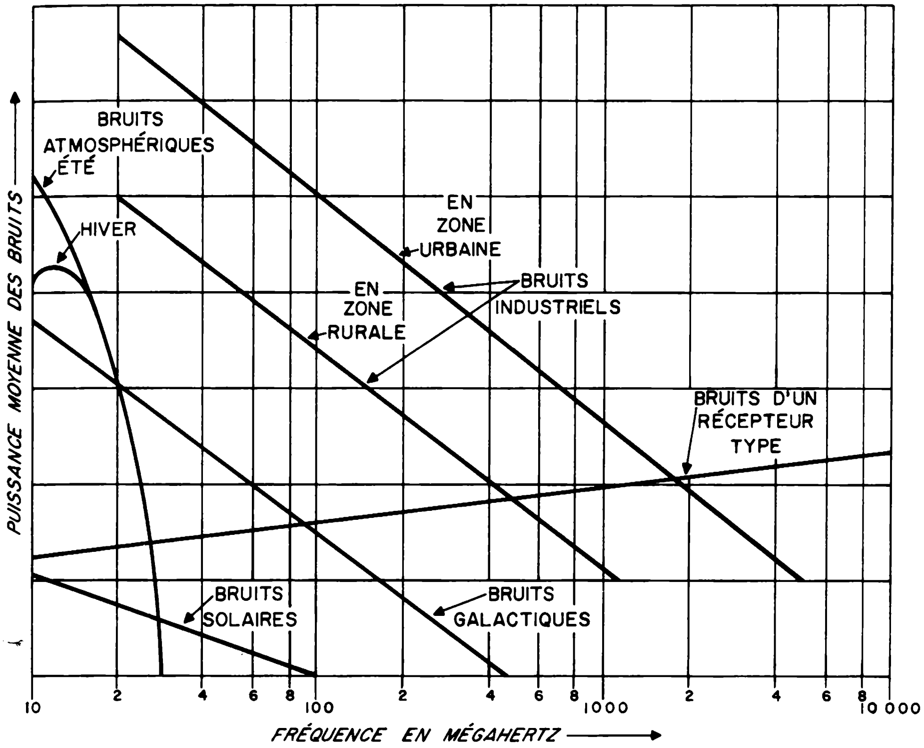


Fig. 1.11. Influence relative de bruits d'origines diverses.

Les bruits dans un récepteur sont des *bruits électriques*: ceux-ci proviennent du fait que la conduction n'est jamais uniforme: il est toujours des nuages d'électrons se déplaçant sporadiquement dans un conducteur; tout conducteur n'étant pas à la température de 0 Kelvin – qui est la plus basse température théorique, en fait impossible à atteindre – produit un bruit dont le carré de la valeur efficace est proportionnel à la bande de fréquence du courant passant dans le conducteur Δf, à la température T et à la résistance du conducteur R:

$$E^2 = 4\,k\,T\,R\,\Delta f \tag{1-8}$$

k est la constante de Boltzmann, soit $1{,}38.10^{-23}$ joule/K

T est la température du conducteur, mesurée en K

R est mesurée en Ohms

Δf est mesurée en Hertz

Une des hypothèses généralement acceptées afin de faciliter les calculs concernant la construction de récepteurs est celle du *bruit blanc*: un bruit blanc serait un bruit dont la probabilité d'apparition est égale pour toutes les fréquences et dont l'amplitude serait identique pour toutes les fréquences.

Aux limitations engendrées par les bruits s'ajoute un autre inconvénient, celui de *l'absorption atmosphérique*: au-dessus de 10 GHz, l'atmosphère absorbe certaines fréquences car l'énergie électromagnétique est transférée aux atomes et molécules de l'atmosphère sous forme de vibrations et de léger échauffement. La figure 1.12 présente l'atténuation due à l'oxygène de l'air et à la vapeur d'eau. Les fréquences 60 GHz et 120 GHz ne sont pas adéquates pour les émissions à longue distance: il en est de même pour les fréquences 23 ou 180 GHz, à moins que l'air ne soit très sec. Les fréquences 33 GHz et 110 GHz sont, par contre, très peu atténuées.

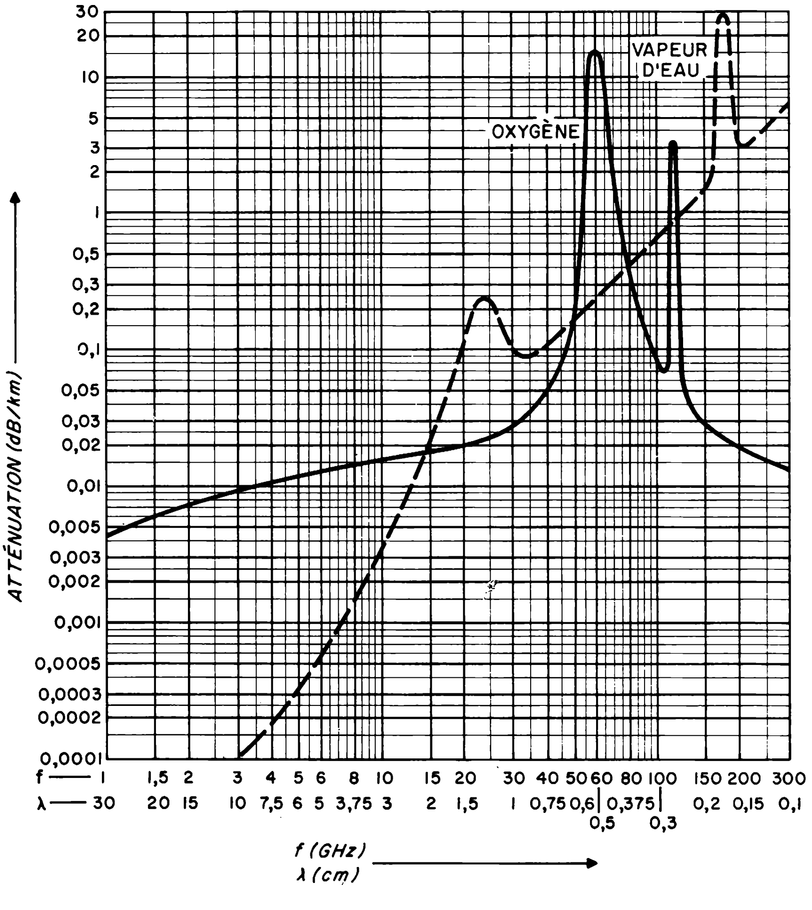


Fig. 1.12. Absorption atmosphérique d'ondes électromagnétiques.

6. EFFETS ACCOMPAGNANT LES RAYONNEMENTS ELECTROMAGNETIQUES

Les rayonnements électromagnétiques provoquent dans l'organisme humain diverses influences, selon la fréquence et la puissance des radiations émises, ainsi que la durée d'exposition de l'organisme à ces radiations.

Les rayons lumineux, nous l'avons vu, excitent la rétine de l'oeil, provoquent une sensation transmise par les nerfs optiques au cerveau où elle est traduite sous forme d'image. La chaleur provoque l'émission de rayons infrarouges: cette propriété permet de détecter la présence d'organismes vivants dans l'obscurité: l'image sur une pellicule sensible à l'infrarouge varie en intensité selon la température des différents objets rencontrés.

Les rayons ultraviolets provoquent le bronzage: ils sont créés artificiellement dans les lampes solaires.

L'énergie portée par une onde est proportionnelle à la fréquence de celle-ci; de ce fait, les rayons X sont très pénétrants et donc utilisés en radiographie. Les rayons cosmiques, eux, présentent un danger non négligeable pour les véhicules spatiaux; l'on utilise des ondes SHF qui sont beaucoup moins pénétrantes pour les fours à micro-ondes, permettant de réchauffer des aliments.

Un puissant rayonnement électromagnétique de haute fréquence peut nuire à l'organisme s'il est émis trop longtemps: les radiations ont pour effet de réchauffer les cellules épidermiques et l'organisme réagit en refroidissant les parties chauffées au moyen d'une circulation de sang plus intense; deux régions du corps sont particulièrement sensibles au fait que la circulation du sang y est plus lente: les yeux et les organes génitaux. Une plus grande exposition à un rayonnement puissant pourrait entraîner la calvitie, des malaises et des vomissements, voire des désordres plus graves.

Il existe des tables calculées déterminant les normes optimales d'énergie radiante dans les stations d'émission et les stations radar: de façon générale, une densité de puissance de 1 mW/m^2, diffusée continuellement, est considérée comme inoffensive; une densité de puissance de 10 mW/m^2 peut être supportée pendant un temps très court seulement.

La présence de rayonnements électromagnétiques puissants peut faire détonner l'essence mise au contact de l'air et il est donc recommandé d'éviter les émissions à partir d'un véhicule lors d'un approvisionnement en essence. De puissants rayonnements pourraient induire un courant suffisamment fort pour déclencher un détonateur électrique.

B - MODES DE PROPAGATION D'ONDES HERTZIENNES

Les ondes radio peuvent être propagées d'une antenne d'émission à une antenne de réception de diverses manières: en suivant la courbure du sol, en travers de l'atmosphère, ou par réflexion au moyen de réflecteurs naturels ou artificiels, et ce, en fonction de leur fréquence.

Les *ondes de sol*, ou ondes de surface, sont des ondes se propageant le long du sol sans être gênées par les obstacles et peuvent atteindre des milliers de kilomètres en très basse fréquence.

Les *ondes directes*, ou ondes d'espace, se propagent en ligne droite et sont donc utilisées à condition qu'il y ait portée optique entre les antennes d'émission et de réception; cette méthode est utilisée à partir des très hautes fréquences (VHF).

La *transmission par réflexion ionosphérique* est possible du fait que la couche ionosphérique contenue dans l'atmosphère réfléchit les ondes de haute fréquence (HF) qui l'atteignent.

La *transmission par diffraction troposphérique* est due à la propriété d'une autre couche atmosphérique, la troposphère, de changer brusquement l'indice de réfraction, vu la proximité de masses d'air et des vapeurs d'eau: ceci implique donc réfractions et réflexions et facilite les communications à longues distances.

1. LES ONDES DE SURFACE

L'onde de surface suit la courbure de la terre (figure 1.13). La portée dépend de la nature du sol rencontré, de la fréquence et, bien sûr, de la puissance de l'émission.

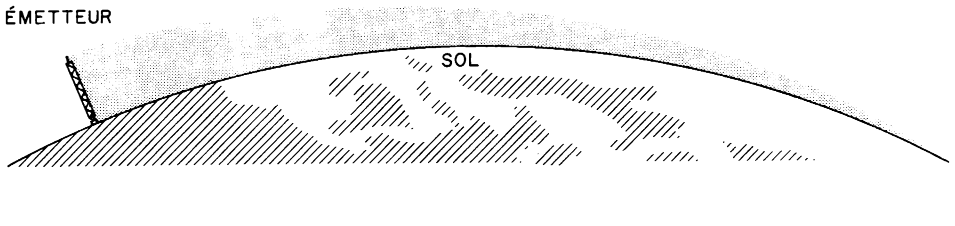


Fig. 1.13. Propagation d'ondes de sol.

Une partie de l'énergie de l'onde de surface est absorbée par le sol et y provoque des courants induits; l'absorption d'énergie est beaucoup plus importante en polarisation horizontale et c'est pourquoi les émissions s'effectueront en polarisation verticale.

La conductivité du sol influe sur la portée des ondes de surface: pour une même puissance d'émission, la portée est beaucoup plus grande en mer qu'en terrain agricole ou qu'en terrain aride: les conductivités de divers sols sont représentées dans le tableau 3.

TABLEAU 3	
CONDUCTIVITE DU SOL (en S/m)	
MER	5
RÉGION FORESTIÈRE	8.10^{-3}
RÉGION ARIDE ou SABLONNEUSE	2.10^{-3}
VILLES	1.10^{-3}

Les émissions en onde de sol sont atténuées avec la fréquence: l'on peut atteindre une portée de plusieurs milliers de kilomètres en très basses fréquences (VLF) de quelques centaines de kilomètres en fréquences moyennes (MF) et quelques dizaines de kilomètres en hautes fréquences (HF).

La figure 1.14 représente la portée pratique d'ondes de sol au-dessus du continent et au-dessus de la mer, en fonction de leur fréquence.

2. LA TRANSMISSION PAR REFLEXION IONOSPHERIQUE

L'atmosphère qui nous enveloppe est une masse de gaz de moins en moins dense au fur et à mesure que l'on s'élève; l'on divise l'atmosphère en trois couches principales: la troposphère, la stratosphère et l'ionosphère.

La troposphère s'étend de la surface de la terre à une altitude approximative de 10 km et est caractérisée par le fait que la température décroît avec la hauteur; c'est dans la troposphère que se déroulent les perturbations météorologiques.

La stratosphère, un peu plus calme et de température uniforme, s'élève jusqu'à une cinquantaine de kilomètres.

L'ionosphère s'étend entre 50 et 400 kilomètres environ; l'énergie irradiée par le soleil (rayons ultraviolets, α, β, γ) ainsi que par les ondes cosmiques, est suffisante pour dissocier en ions positifs et négatifs les molécules de l'air, l'ionisation étant beaucoup plus importante le jour que la nuit. Cette couche conductrice sert de *miroir* aux ondes électromagnétiques incidentes.

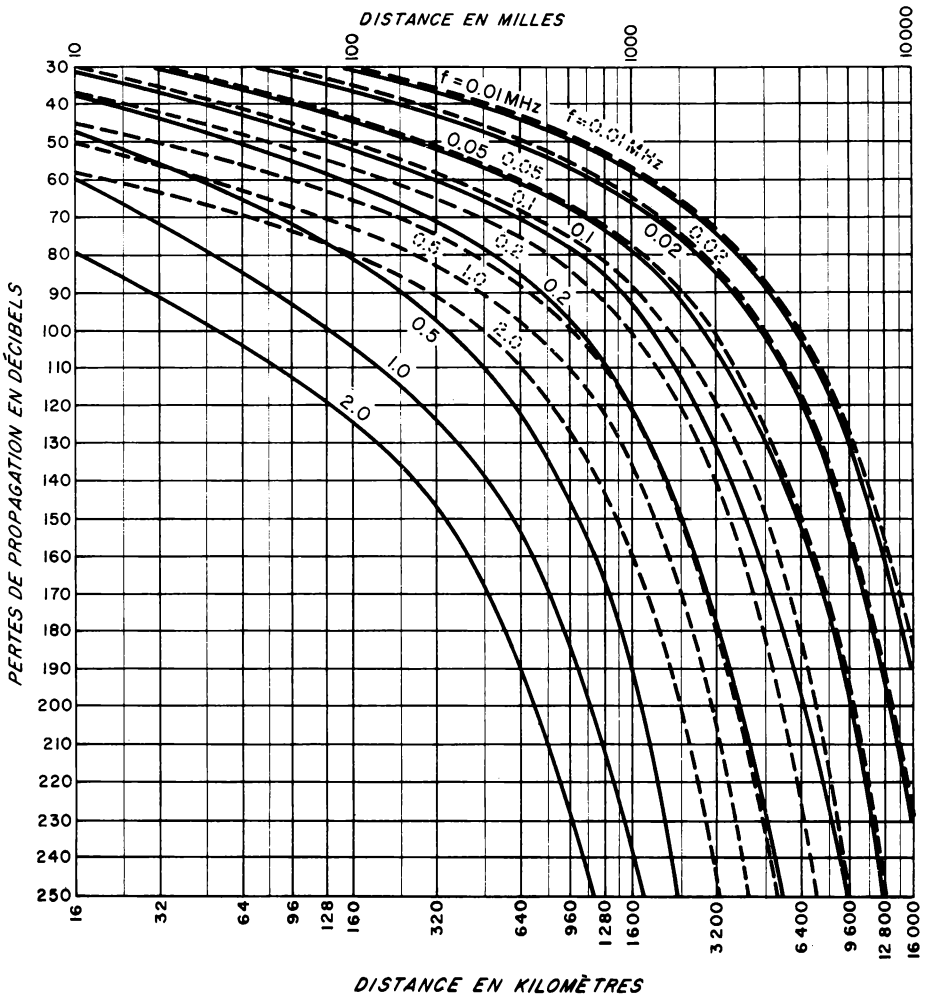


Fig. 1.14. Effets de la nature du sol et de la fréquence sur les ondes de sol; en trait plein: propagation au-dessus du sol, en pointillé: propagation au-dessus de l'océan.

L'onde émise en direction de l'ionosphère est réfléchie par cette dernière pour retomber sur terre à des distances considérables (figure 1.15A). Une double réflexion peut même avoir lieu dans certains cas, comme le montre la figure 1.15B, ce qui augmente considérablement la portée des ondes.

Ce phénomène s'explique par le fait que l'indice de réfraction de l'atmosphère décroissant avec la hauteur, l'onde électromagnétique passe d'un milieu d'indice de réfraction plus fort à un milieu d'indice de réfraction plus faible (voir figure 1.5) et est donc astreinte à être réfléchie ou réfractée selon les angles d'incidence avec l'ionosphère.

L'ionosphère se subdivise en sous-couches d'altitudes différentes: D, E, F_1 et F_2, ainsi qu'elles sont présentées dans la figure 1.16.

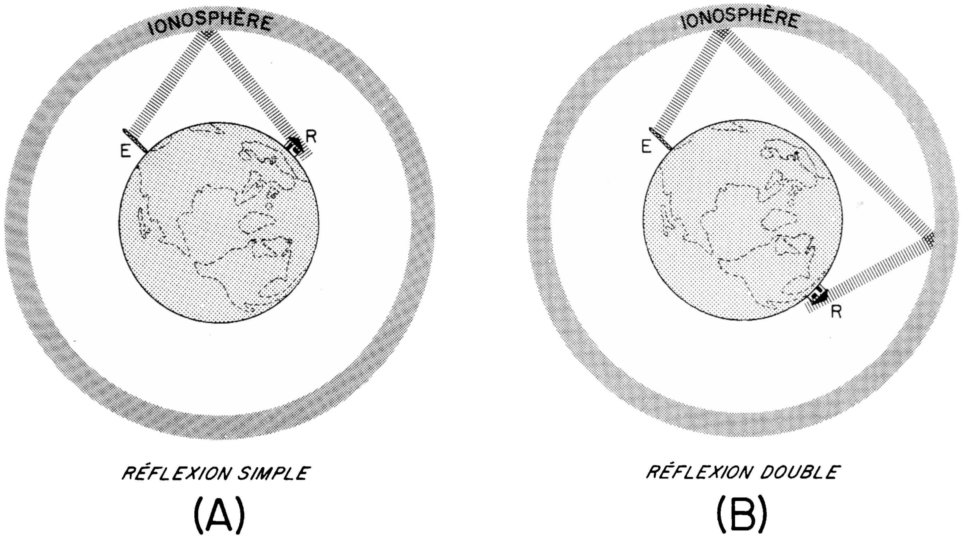


Fig. 1.15. Réflexion ionosphérique des ondes.

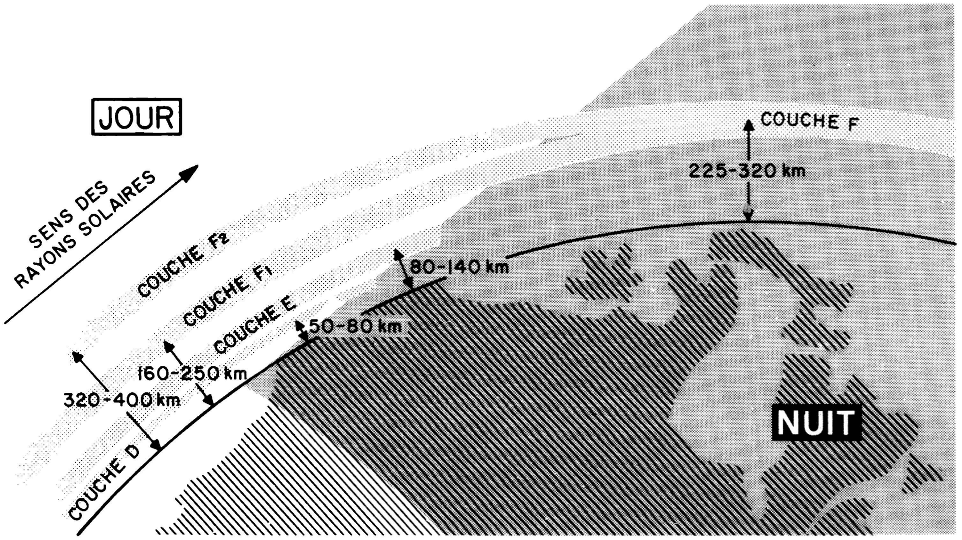


Fig. 1.16. Les couches ionosphériques.

La couche D est la plus basse et se situe à une hauteur moyenne de 70 kilomètres et à une épaisseur de 10 kilomètres environ; le degré d'ionisation dépend de l'activité solaire, ce qui fait que cette couche est pratiquement inexistante la nuit. Cette couche réfléchit certaines ondes VLF et LF, absorbe partiellement les ondes MF et laissse passer les ondes HF, quoique d'une façon atténuée.

Les limites de la couche E se situent entre 80 et 140 kilomètres environ. Cette couche, plus imperméable que la précédente, ne laisse passer que des ondes dont la fréquence est supérieure à 25 MHz et, comme la couche D, disparaît pratiquement la nuit. Elle réfléchit les ondes HF durant le jour et permet une portée d'émissions de près de 1000 kilomètres.

La couche F_1, d'une épaisseur de 20 kilomètres, se recombine avec la couche F_2 la nuit. Elle réfléchit ou réfracte certaines ondes HF.

La couche F_2 est la couche la plus réfléchissante et persiste la nuit; elle permet les transmissions éloignées en HF surtout.

Bien entendu, la séparation entre les différentes couches que nous venons de décrire n'est pas bien nette, vu la dépendance du degré d'ionisation en fonction de l'heure de la journée ou de la nuit, ou même des saisons; il ne s'agit que d'une approximation visant à schématiser le processus de propagation par réflexion ionosphérique.

Remarquons que, du fait de la disparition des couches D et E la nuit, les signaux normalement réfléchis par ces couches sont réfléchis par la couche la plus élevée, la couche F. Il en résulte un saut plus grand, comme le montre la figure 1.17.

La portée utile d'une onde radio dépend, pour un état ionosphérique donné, de la fréquence de l'onde et de son inclinaison; ces deux facteurs entrent en considération pour établir des communications à longue distance.

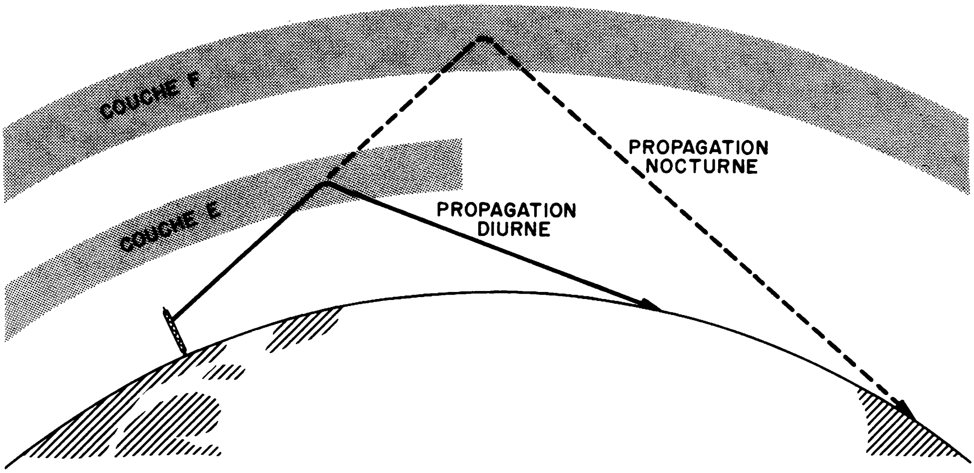


Fig. 1.17. Effets de la disparition de la couche E sur le "saut" de l'onde.

Lorsque nous augmentons la fréquence d'une onde, nous accroissons en général sa portée: cela s'explique par le fait que les ondes de fréquence plus élevée pénètrent davantage les couches de l'ionosphère et ne sont réfléchies que par les couches supérieures. Cependant, si nous dépassons 30 MHz, l'onde traversera successivement toutes les couches de l'ionosphère et ne sera pas renvoyée vers le sol. Cette fréquence est appelée *fréquence critique.* La figure 1.18 illustre les données précitées.

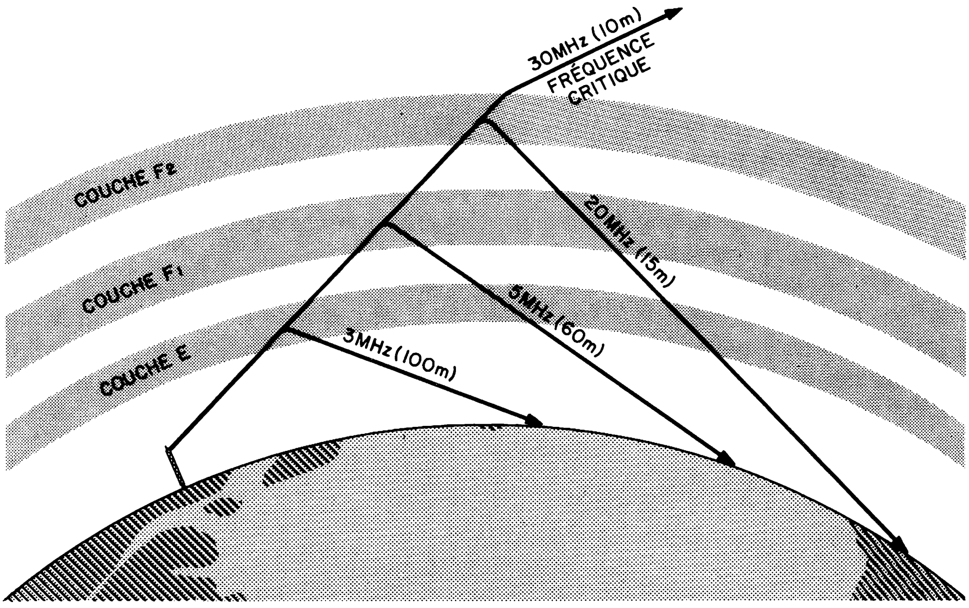


Fig. 1.18. La portée d'une onde réfléchie par l'ionosphère dépend de sa fréquence.

L'angle d'inclinaison que fait l'onde incidente avec la normale à l'ionosphère détermine la portée de l'onde comme l'illustre la figure 1.15. Remarquons que plus l'angle d'incidence α augmente, plus la portée est grande; si l'angle d'incidence est plus petit que *l'angle limite,* il n'y a plus réflexion mais réfraction comme c'est le cas pour les ondes AB_1 et AB_2 de la figure 1.19.

L'on remarque cependant qu'il peut y avoir réflexion d'ondes dont la fréquence est supérieure à la fréquence critique, selon l'angle d'incidence α; si f_c est la fréquence critique pour une incidence verticale, la fréquence maximale réfléchie f_{max} est donnée par la relation:

$$f_{max} = \frac{f_c}{\cos \alpha} \qquad (1\text{-}9)$$

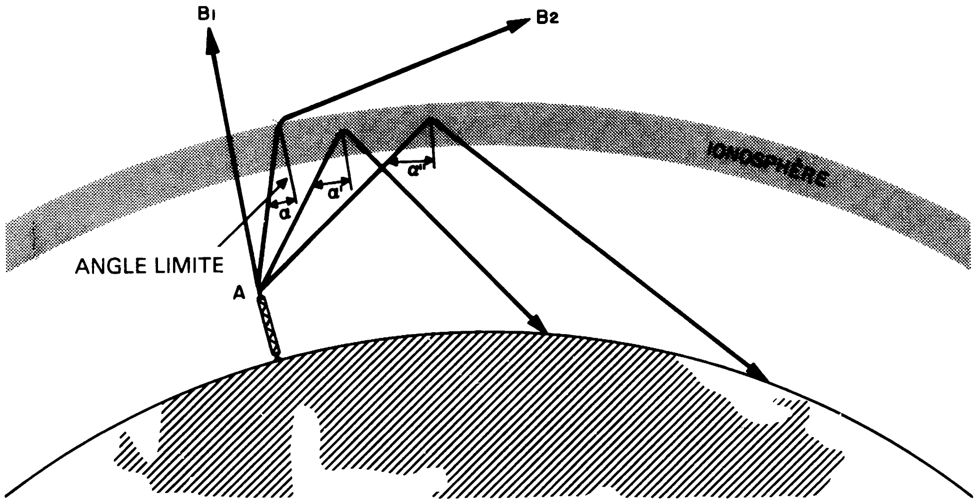


Fig. 1.19. Réflexion suivant divers angles d'incidence de l'émission.

L'onde rabattue vers le sol peut être réfléchie de nouveau (réflexion terrestre) et être retournée dans l'ionosphère où une seconde réflexion se produira; une certaine zone autour de l'émetteur est couverte par les ondes de sol ou ondes de surface, couvrant ainsi une partie de la zone non couverte par le *saut* de l'onde réfléchie par l'ionosphère. La partie non couverte restante est alors une véritable *zone de silence* (figure 1.20).

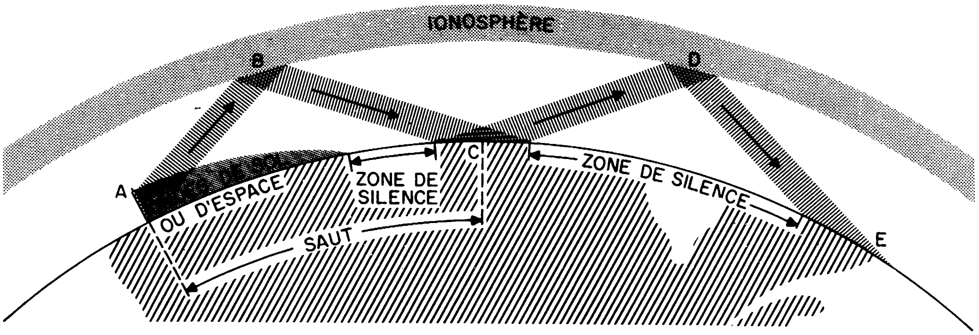


Fig. 1.20. Les zones de silence.

Les évanouissements d'ondes, ou fading, sont dus à l'instabilité des couches ionisées, ou à l'interférence de l'onde réfléchie par l'ionosphère avec une onde de surface (fig. 1.21): en un même point sont reçues différentes ondes ayant suivi des trajets différents: si ces ondes arrivent en phase, elles s'ajoutent et la réception est bonne; si la différence de trajet est telle que les ondes sont reçues en opposition de phase, la réception est nulle. Il se produit donc des changements d'intensité de réception en un même lieu, changements qui se traduisent par des renforcements ou diminutions (évanouissements) irréguliers et désagréables à l'audition du récepteur. Il est possible de surmonter ce problème en installant plusieurs antennes aboutissant à un même récepteur ou en émettant sur plusieurs fréquences parallèlement; mais ces procédés ont l'inconvénient d'être beaucoup plus onéreux.

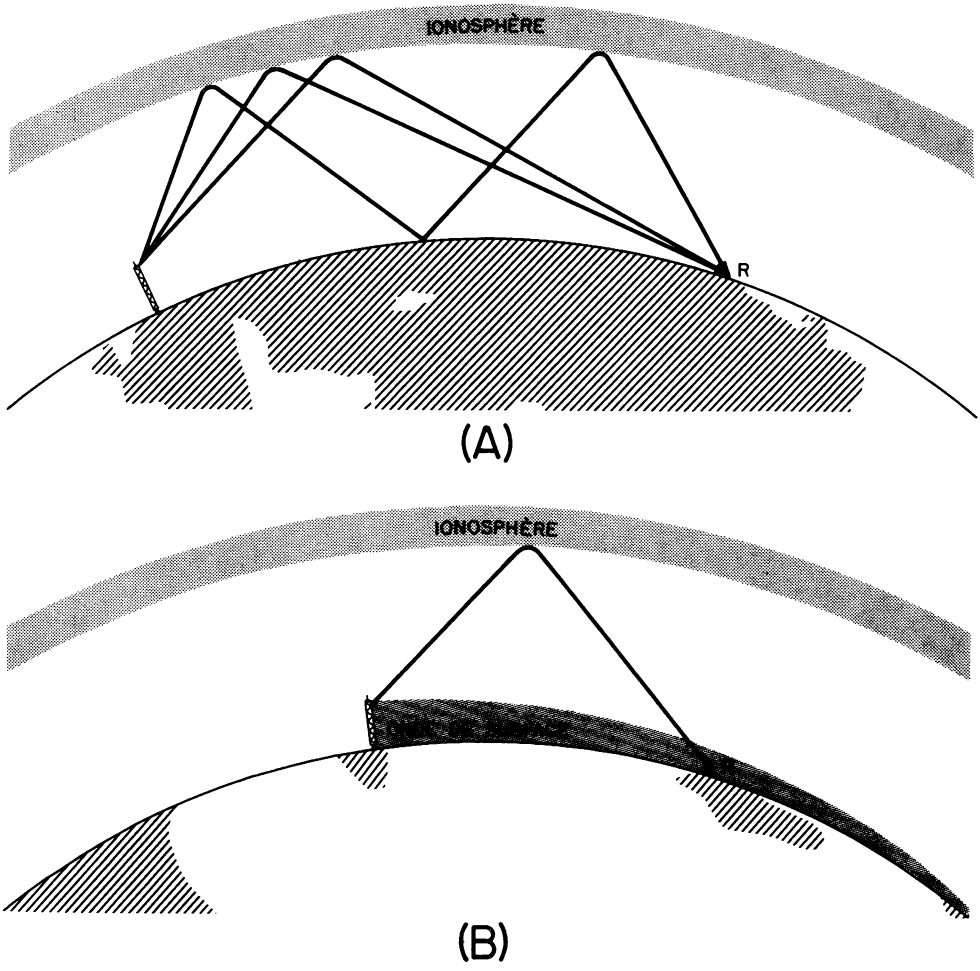


Fig. 1.21. Evanouissement d'ondes (fading).
A - Le déphasage entre ondes diverses produit des évanouissements d'onde au point R.
B - Le déphasage entre l'onde de surface et l'onde réfléchie produit des évanouissements d'ondes au point R.

3. LES ONDES D'ESPACE

Les ondes d'espace, ou ondes directes, se propagent en ligne droite et nécessitent donc une ligne de vue entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception. La surface de la terre n'étant pas plane, la portée de telles ondes est donc limitée; un calcul géométrique simple permet de conclure que la portée d'une onde émise par une antenne se trouvant à une hauteur h_t, et captée à même le sol, est égale à $\sqrt{2h_t R}$; R étant le rayon de la terre, soit 6 400 kilomètres. Cela équivaudrait à une portée de 36 kilomètres pour une antenne haute de 100 mètres.

L'on remédie à cet inconvénient en se servant d'antennes aussi hautes que possible, ou d'antennes intermédiaires, voire des satellites artificiels en orbite autour de la terre; la portée maximale entre deux antennes disposées à altitudes respectives h_t et h_r serait:

$$d = d_t + d_r = \sqrt{2h_t R} + \sqrt{2h_r R} \qquad (1\text{-}10)$$

Ce mode de propagation est utile à des fréquences VHF et au-delà (voir figure 1.22).

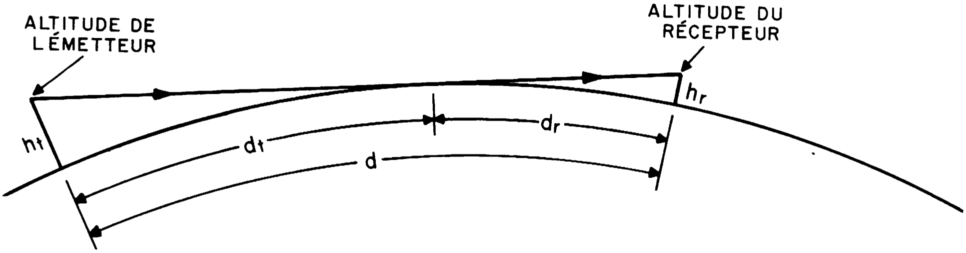


Fig. 1.22. Portée maximale d'ondes directes.

Un phénomène assez rare, que l'on rencontre à émission en onde d'espace, est celui de la super-réfraction. La propagation d'ondes d'espace se fait généralement en ligne droite; un changement d'indice de réfraction de l'atmosphère pourrait cependant altérer la trajectoire rectiligne: c'est ce qui se produit lors des *inversions de température*: dans certaines conditions atmosphériques, une couche d'air chaud peut être captive au-dessus d'une couche d'air froid, comme c'est souvent le cas au-dessus de l'océan, dans les zones subtropicales surtout; le changement brusque de l'indice de réfraction peut donc *courber* la trajectoire vers le sol, pareillement à la réflexion ionosphérique; ce phénomène de super-réfraction se produit lors d'une augmentation de température avec la hauteur au lieu d'une décroissance progressive de 6,5° C par kilomètre. Cette couche d'air chaud, en général captive à une hauteur de 40 mètres, peut empêcher la diffusion de l'onde sur plus de 1000 kilomètres, et ce, par réflexion successives (figure 1.23).

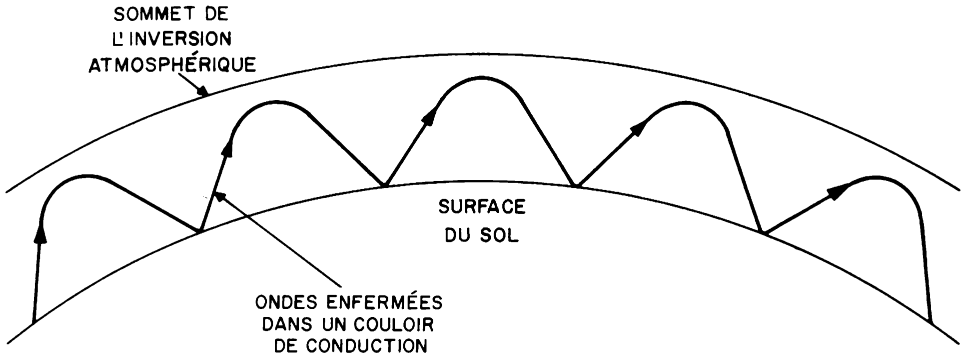


Fig. 1.23. Super-réfraction dans l'inversion atmosphérique.

La communication via satellites en orbite autour de la terre exige de ceux-ci une vitesse angulaire pareille à celle de la terre.

La communication via satellites se fait à des fréquences bien supérieures à la fréquence critique afin de minimiser la réfraction; celle-ci n'est plus à craindre à partir de 100 MHz et, l'absorption atmosphérique d'onde étant négligeable jusqu'à 12 GHz environ, les fréquences utilisées seront limitées par ces deux considérations.

Du fait de la rotation de la terre, la présence des couches ionisées de l'ionosphère dans le champ magnétique terrestre crée un effet Faraday impliquant un changement de polarisation de l'onde: cet effet se fait sentir jusqu'à 1 GHz. L'on remédie à cet effet en utilisant des antennes à polarisation circulaire pouvant capter à la fois les composantes horizontales et verticales de l'onde polarisée, ou en utilisant des fréquences allant de 1 GHz à 10 GHz.

4. LA DISPERSION TROPOSPHERIQUE

Les communications par réflexion troposphérique prennent de plus en plus d'importance dans les fréquences UHF. Du fait de changements abrupts d'indice de réfraction dans la troposphère, changements dus à la présence adjacente de masses d'air à des températures et des degrés d'humidité différentes. Les ondes incidentes sont donc réfractées ou réfléchies, souvent plus d'une fois avant de retomber dans diverses directions vers le sol (fig. 1.24).

De nombreux inconvénients résultent de ce mode de propagation: l'émission peut être retenue dans la troposphère dans des espaces de temps variables et peut en revenir comprimée ou retardée; le principal inconvénient reste l'évanouissement d'ondes (fading), où les diverses voies de propagation aboutissent au récepteur, ainsi que les conditions atmosphériques variables. Il est donc un côté aléatoire à ce mode de propagation qui reste quand même efficace lorsqu'on utilise de grandes puissances d'émission.

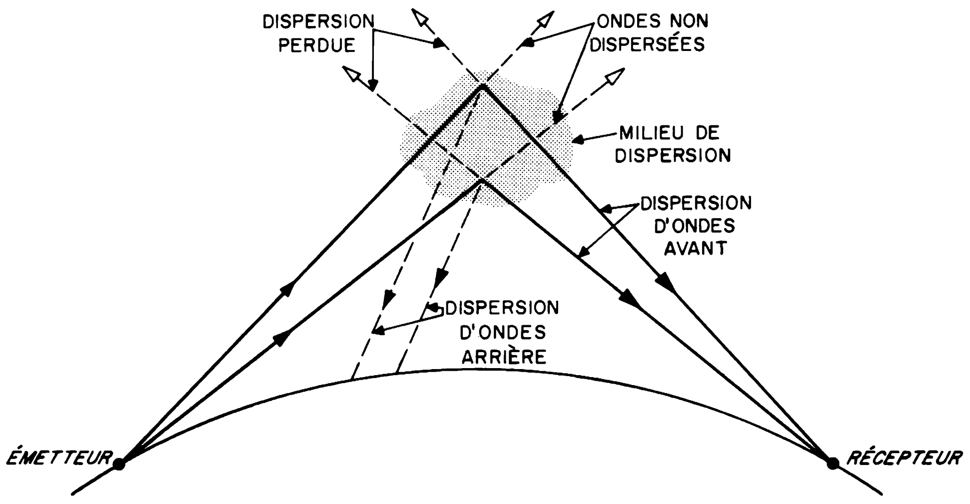


Fig. 1.24. La propagation par dispersion troposphérique.

5. LES FREQUENCES APPROPRIEES AUX DIVERS MODES DE PROPAGATION

Résumons succinctement les fréquences appropriées aux divers modes de propagation.

Ondes VLF
Les ondes se propagent en ondes de surface et peuvent atteindre une portée de plusieurs milliers de kilomètres.

Elles peuvent être émises de nuit par réflexion ionosphérique, cas dans lequel elles sont réfléchies par les couches D et E de l'ionosphère.

Ces ondes pénètrent sous l'eau à quelques dizaines de mètres de profondeur, ce qui les rend utilisables en communication sous-marine.

Ondes LF
Ces ondes peuvent atteindre quelques milliers de kilomètres lorsqu'elles sont propagées en ondes de surface et peuvent être réfléchies par l'ionosphère la nuit.

Ondes MF
La portée de ces ondes est de quelques centaines de kilomètres en ondes de surface; un tel rayonnement d'émission convient parfaitement aux stations d'émission de pays de grandeur moyenne. Ces ondes peuvent être réfléchies la nuit par les couches D et E de l'ionosphère.

Ondes HF

Ces ondes peuvent atteindre quelques dizaines de kilomètres lorsqu'elles sont émises en ondes de surface et sont donc inefficaces pour les stations d'émission. La méthode idéale appropriée à ces ondes est la transmission via l'ionosphère. L'on peut utiliser efficacement les fréquences variant de 11 à 30 MHz le jour et de 3 à 10 MHz la nuit.

Ondes VHF

Ces ondes dépassant la fréquence critique ne sont plus utilisables en réfraction ionosphérique mais seulement en ondes directes.

Les ondes dont la fréquence est supérieure au domaine VHF ne sont utilisées qu'en ondes directes. Les ondes UHF peuvent cependant être utilisées en réfraction troposphérique; l'utilisation des diverses fréquences est limitée par l'absorption atmosphérique (voir figure 1.12).

6. L'ATTRIBUTION INTERNATIONALE DES FREQUENCES D'ONDES HERTZIENNES

L'attribution de bandes de fréquences à diverses fins est codifiée internationalement*. Nous en donnons ci-après les éléments: (Zone européenne)

De 10 kHz à 520 kHz

- Systèmes de localisation utilisés par les avions et les navires.
- Communications radiotélégraphiques.

La fréquence de 500 kHz (600 m) est la fréquence de détresse en mer. Les stations côtières se livrent toutes les demi-heures à une écoute sur cette fréquence.

De 520 kHz à 1605 kHz

Bande utilisée pour la radio-diffusion sonore en modulation d'amplitude (AM).

De 1605 kHz à 5850 kHz

Surtout radiotéléphonie.

On trouve dans cette bande une autre fréquence de détresse: 2182 kHz, ainsi que quelques bandes de radiodiffusion exploitées sous les tropiques, en raison de la trop forte densité de parasites atmosphériques dans ces régions, gênant la diffusion des ondes sur des fréquences plus basses.

* *Le règlement des communications est un document juridique ratifié par tous les pays membres de l'Union Internationale des Télécommunications, réglementant l'utilisation des ondes radio-électriques.*

De 5 850 kHz à 26 100 kHz (ou encore de 5,850 MHz à 26,10 MHz)

Les divers utilisateurs de cette bande (radiodiffusion, amateurs, aviation, marine) profitent de la facilité de propagation de ces ondes qui se réfléchissent sur l'ionosphère couvrant ainsi de très grandes distances tout en utilisant une puissance modeste. Les bandes attribuées à la radiodiffusion internationale sont les suivantes:*

Bande des 49 m	5,850 MHz à 6,410 MHz
Bande des 41 m	7,100 MHz à 7,600 MHz
Bande des 31 m	9,500 MHz à 9,775 MHz
Bande des 25 m	11,45 MHz à 12,48 MHz
Bande des 19 m	14,67 MHz à 16,00 MHz
Bande des 16 m	17,00 MHz à 18,75 MHz
Bande des 13 m	20,70 MHz à 22,80 MHz
Bande des 11 m	25,60 MHz à 26,10 MHz

De 26,10 MHz à 41,00 MHz

Radiocommande, radiotéléphonie privée, trafic mobiles en FM.

De 41,00 MHz à 68,00 MHz (47,00 MHz à 68 MHz pour l'Europe)

Bande réservée à la télévision VHF (Bande I)

De 88,00 MHz à 104 MHz

Radiodiffusion sonore en modulation de fréquence.

De 108 MHz à 162 MHz.

Bande occupée par les liaisons radiotéléphoniques de l'aviation et la télémétrie, radio téléphone urbain, bande amateur (144 MHz).

De 162 MHz à 216 MHz (France) – De 174 MHz à 230 MHz (Europe)

Télévision VHF, Bande III

De 216 (ou 230 MHz) à 470 MHz

Bande allouée aux services de radiotéléphonie et radiolocalisation, balises, radio-sondes, télécommunications tactiques.

* *Ces bandes appartiennent toutes à la catégorie d'ondes appelées communément ondes courtes.*

De 470 MHz à 890 MHz (Bandes IV et V)

Télévision UHF (canaux 21 à 68), soit un total de 48 canaux logés dans cette bande (pour l'Europe, l'Europe de l'Est et l'URSS).

Télévision UHF (Canaux 14 à 83) soit 70 canaux pour les USA.

De 880 MHz à 940 MHz

Télécommunications civiles. Faisceaux à diffusion troposphérique.

De 960 MHz à 1350 MHz

Radiotéléphonie, transmissions par faisceaux hertziens, radars, radio-localisation, télémesure, télécommande.

De 1350 MHz à 2700 MHz

Transmissions à l'aide de satellites de données météorologiques, radiosondes.

De 3 GHz à 35 GHz

Communications par satellites, radiolocalisations, amateurs, radio-astronomie, recherches spatiales, radionavigation, radars.

Les fréquences supérieures à 35 GHz sont techniquement difficiles à maîtriser pour l'instant.

2. LES ANTENNES

A- PRINCIPE DES ANTENNES

Une antenne d'émission est un conducteur qui transforme une énergie électrique en énergie de rayonnement électromagnétique. Une antenne de réception traduit un rayonnement électromagnétique en courant électrique induit. La même antenne peut souvent servir à émettre ou capter selon qu'elle est alimentée ou non en courant.

Afin de mieux comprendre le mécanisme de rayonnement, procédons à quelques rappels.

Un conducteur dans lequel passe un courant I produit dans son entourage un champ magnétique dont l'intensité décroît en fonction de la distance du conducteur et, compte tenu de la direction, perpendiculaire à celle du conducteur. Le sens du champ magnétique est conforme à la représentation donnée dans la figure 2.1.

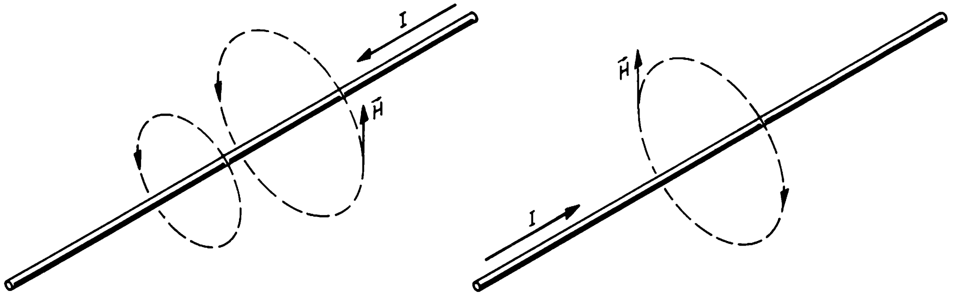


Fig. 2.1. Champ magnétique créé par un courant I.

D'autre part, un courant circulant dans un conducteur correspond à un déplacement de charges à l'intérieur de ce conducteur. Nous pourrions donc considérer que l'effet provoqué par un courant est d'accumuler des charges positives à l'une des extrémités du conducteur et des charges négatives à l'autre. Celles-ci donneront lieu à des lignes de champ électriques telles que représentées dans la figure 2.2.

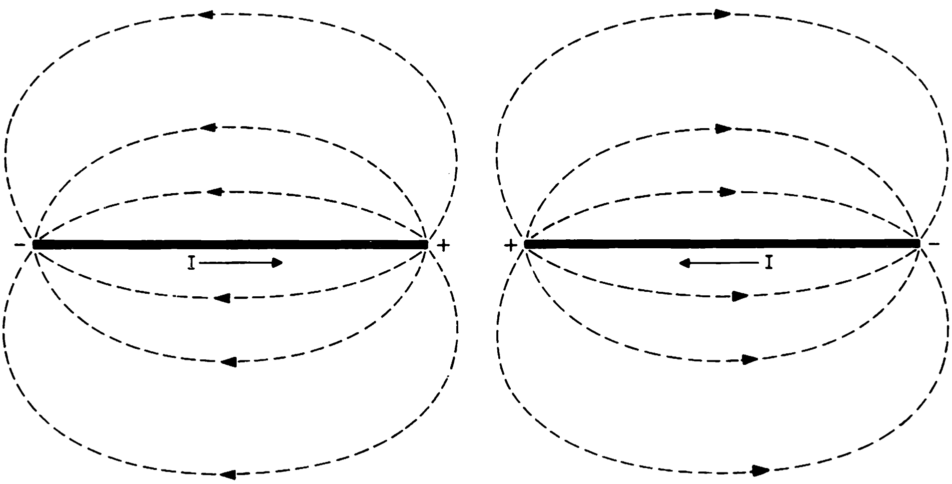


Fig. 2.2. Champ électrique créé par un courant I dans un conducteur.

Il existe donc des champs électriques et magnétiques perpendiculaires l'un par rapport à l'autre dans l'entourage du conducteur (fig. 2.3). Si ces champs varient dans le temps — cas où le conducteur est alimenté par une source de courant alternatif — nous aurons une onde électromagnétique se propageant perpendiculairement aux deux champs. Notons que le changement de sens du courant dans un conducteur entraîne un changement de sens des deux champs créés, le sens de propagation de l'onde électromagnétique créé demeurant inchangé.

1. GENERALITES

Conformément à ce que nous venons de voir, tout fil électrique dans lequel passe un courant est une antenne d'émission et tout fil électrique peut servir d'antenne de réception. La portée de la radiation émise par un fil électrique dépendra de la puissance électrique mise en jeu: pour cette raison, la majorité des câbles électriques nous entourant ne font qu'émettre des bruits électromagnétiques de faible puissance et captent des courants induits, en général insignifiants. Ajoutons à cela qu'une même antenne pourra servir d'antenne d'émission ou d'antenne de réception à la différence près que la première devra supporter des courants extrêmement forts. A partir des fréquences UHF, la même antenne peut parfaitement servir pour l'émission et la réception.

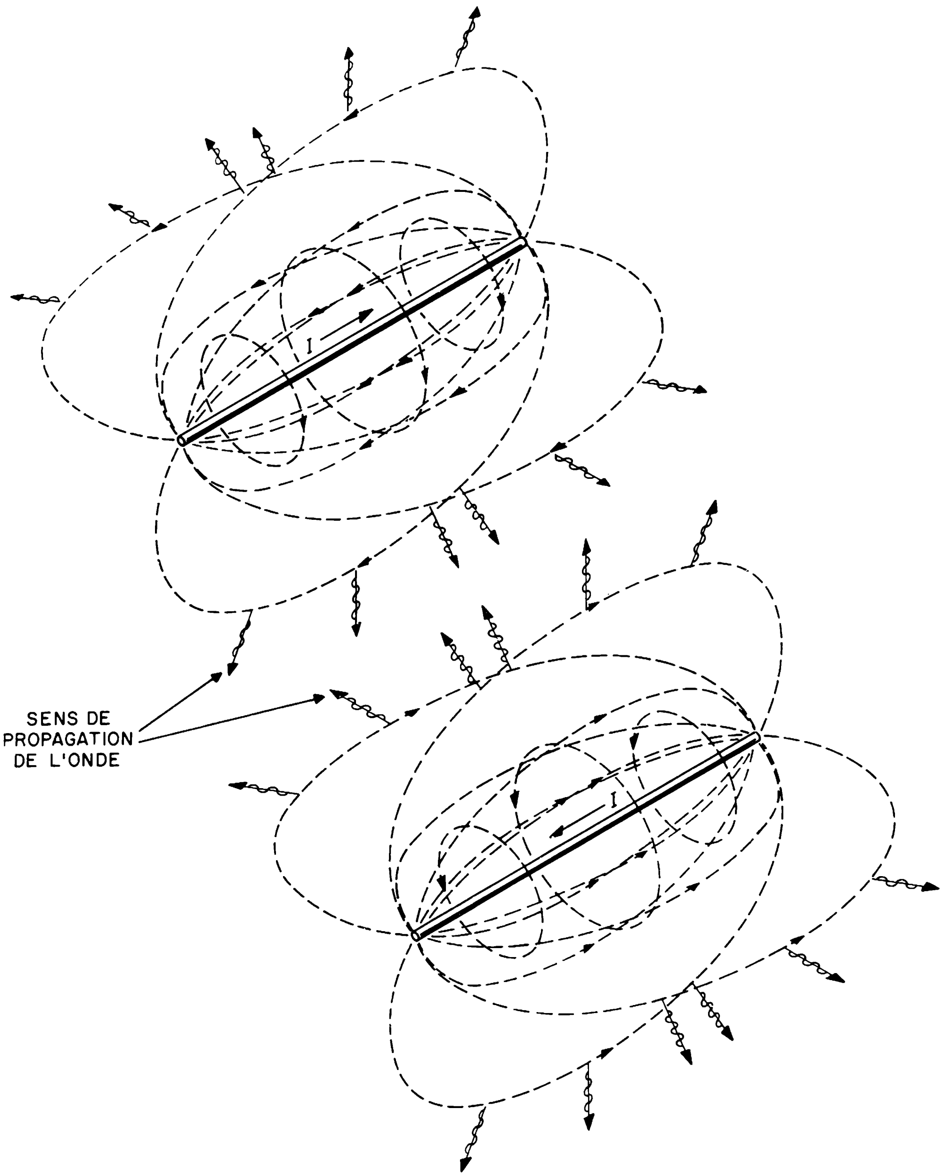


Fig.2.3. Onde électromagnétique émise à partir d'un conducteur alimenté en courant non continu. En pointillé figurent les lignes de champ électrique et magnétique.

La qualité d'une antenne dépendra non seulement de la puissance en jeu mais aussi de sa résistance, de sa longueur et de bien d'autres paramètres que nous étudierons par la suite. De fait, le matériau le plus adéquat pour une antenne d'une longueur excédant 10 mètres est le fil de cuivre, émaillé de préférence, afin d'éviter l'oxydation. Pour les antennes de 10 mètres ou moins, on utilise des tubes de cuivre, de duralumin, ou d'aluminium: les tubes de cuivre ont l'inconvénient d'être rares, lourds et chers; ils sont très peu utilisés. Les tubes de duralumin sont rigides et légers, mais ne peuvent être soudés, ce qui occasionne de mauvais contacts. Les tubes d'aluminium sont rigides et légers, mais de moins bonne conductivité.

La polarisation d'une onde est déterminée par le plan de variation du champ électrique. Autour d'une antenne, la direction du champ électrique résultant est sensiblement parallèle au conducteur. Une antenne maintenue horizontalement propagera donc une onde électromagnétique à polarisation horizontale, tandis qu'une antenne maintenue verticalement propagera une onde électromagnétique à polarisation verticale.

Du fait même que la terre est conductrice, on évite la polarisation horizontale dans les fréquences VLF, LF, MF et, quelquefois même, HF. Pour de plus hautes fréquences, on utilise la polarisation horizontale car la majorité des bruits électromagnétiques d'origine industrielle sont polarisés verticalement.

La densité de puissance de rayonnement p_r en un point de l'espace est définie comme étant proportionnelle au carré de l'intensité du champ électrique E en ce même point de l'espace d'après la formule suivante:

$$p_r = \frac{E^2}{120\,\pi} \qquad (2\text{-}1)$$

p_r est la densité de puissance de rayonnement en W/m^2 et E l'intensité de champ électrique qui se mesure en V/m. A titre d'exemple, une intensité de champ d'environ 500 μV/m suffit pour une réception TV satisfaisante en campagne; par contre, il faut atteindre au moins 5000 μV/m pour obtenir les mêmes résultats en zone urbaine étant donnée l'influence parasite des bruits industriels.

Le graphe 2.4 présente, à partir d'un émetteur de diverses puissances, les résultats théoriques obtenus, c'est-à-dire la densité de puissance de rayonnement et l'intensité de champ correspondant à diverses puissances d'émission, en fonction de la distance à l'émetteur.

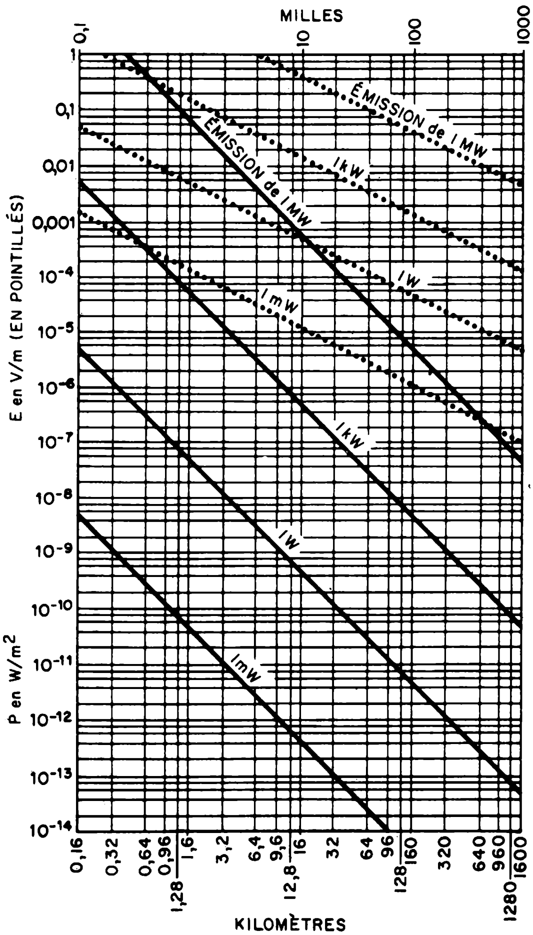


Fig. 2.4. Densité de puissance de rayonnement et intensité de champ existant à diverses distances de l'émetteur.

Etant donné que la puissance de rayonnement dans l'espace libre décroît en fonction du carré de la distance à l'émetteur, on pourrait s'attendre à ce que l'intensité du champ varie en fonction inverse de la distance. Ceci n'est pas toujours vérifié dans la réalité, car le champ électrique est soumis à diverses interférences et à d'autres influences causées par la conductivité du sol.

Exemple: si un émetteur sur 500 kHz produit un champ électrique d'intensité de 100 mV/m à une distance de 100 km, quelle sera l'intensité de champ mesurée à une distance de 300 km ?

Si P_t est la puissance de rayonnement, la densité de puissance p_r à une distance d = 100 km de l'émetteur sera: (d'après formule 1.4)

$$p_r = \frac{P_t}{4\pi d^2}$$

La densité de puissance p'_r à une distance $d' = 300$ km de l'émetteur sera:

$$p'_r = \frac{P_t}{4\pi d'^2}$$

d'où le rapport: $$\frac{p_r}{p'_r} = \frac{d'^2}{d^2} = \frac{(300)^2}{(100)^2} = 9$$

A la densité de puissance p_r correspond une intensité de champ E égale à 100 mV/m et telle que:

$$E = \sqrt{p_r \times 120\pi} = 100 \text{ mV/m}$$

L'intensité de champ E' correspondant à p'_r sera:

$$E' = \sqrt{p'_r \times 120\pi}$$

D'où le rapport: $$\frac{E'}{E} = \sqrt{\frac{p'_r}{p_r}} = \frac{1}{\sqrt{9}}$$

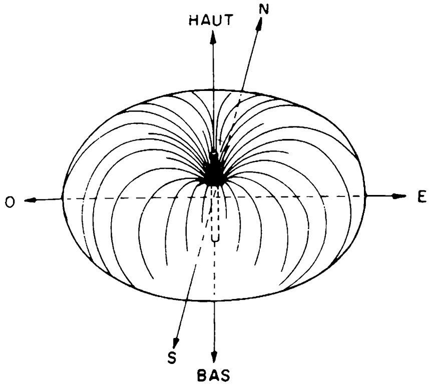
$$E' = \frac{E}{3} = \frac{100}{3} = 33 \text{ mV/m}$$

Ce résultat est théorique vu que, dans la réalité, le champ électrique est soumis à diverses influences.

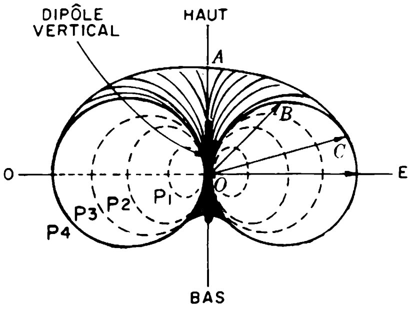
La densité de puissance de rayonnement s'évalue à l'aide d'un *mesureur de champ*: cet appareil permet de mesurer l'intensité du courant induit à la fréquence d'émission dans une antenne standard. Le mesureur de champ permet de mesurer la densité de puissance de rayonnement autour d'une antenne et de vérifier la portée de celle-ci. La représentation de la portée d'une antenne se fait à l'aide de son diagramme de rayonnement.

Le diagramme de rayonnement d'une antenne représente les lieux géométriques des puissances de rayonnement égales dans l'entourage de celle-ci.

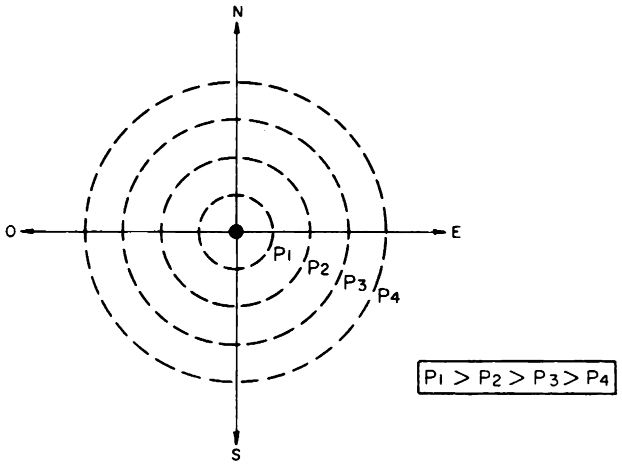
Si nous prenons par exemple le **dipôle élémentaire** qui est une antenne dont la longueur est très inférieure à la longueur d'onde émise, nous obtenons le diagramme de rayonnement tel qu'il est présenté dans la figure 2.5A. Remarquons que le long du dipôle la puissance de rayonnement est nulle. Les cercles en pointillé décrits dans la figure 2.5B indiquent les points dont la puissance de rayonnement est identique autour de l'antenne. Cette distribution provient du fait que la répartition des charges le long du dipôle implique diverses intensités de champ dont les résultantes sont représentées sur la figure 2.5B.



(A)



(B)



(C)

Fig. 2.5. A. Le rayonnement d'un dipôle vertical dans l'espace.

B. Section plan vertical du diagramme de rayonnement du dipôle vertical. Les pointillés indiquent les puissances de rayonnement égales et telles que: $P_1 > P_2 > P_3 > P_4$.

C. Section plan horizontal du diagramme de rayonnement d'une antenne dipôle (vu de haut).

(A et B) Document "Radio Fondamentals". Reproduit, Ministre A.S.C.

Dans le cas d'un dipôle horizontal, les figures 2.5A et 2.5B subiraient une rotation de 90° , la figure 2.5C demeurant inchangée.

2. L'ANTENNE RESONNANTE

Les calculs et l'expérience montrent que la diffusion de rayonnement optimale est obtenue avec une antenne dont la longueur ℓ est égale à une demi-longueur d'onde ($\lambda/2$) de l'onde émise, ou à une longueur égale à un multiple entier de demi-longueurs d'onde.

Soit:

$$\ell = \frac{\lambda}{2} \quad \text{ou} \quad \ell = n\,\frac{\lambda}{2} \quad \text{n étant un nombre entier} \qquad (2\text{-}2)$$

Ceci implique que plus les fréquences sont élevées, plus les antennes utilisées sont courtes: l'ordre de grandeur se situe à une centaine de mètres en MF et de quelques centimètres en UHF.

Une antenne répondant aux critères précédents est dite **antenne résonnante**; et l'antenne dipôle demi-longueur d'onde est dite **antenne de Hertz.**

Le diagramme de rayonnement d'une antenne de Hertz (fig. 2.6) peut être obtenu en considérant le dipôle demi-longueur d'onde comme constitué par une continuité de dipôles élémentaires, et en associant leurs effets.

La distribution de courant et de tension le long d'un dipôle demi-longueur d'onde est donnée dans la figure 2.7, le dipôle servant d'axe de séparation entre valeurs positives et négatives de courant et de tension. Remarquons que cette séparation est au centre du dipôle pour la tension; la distribution est sinusoïdale pour la tension et cosinusoïdale pour le courant.

Notons que l'impédance d'antenne définie par le rapport tension courant est très grande aux extrémités et pratiquement nulle au centre. En pratique, l'impédance de l'antenne de Hertz en son centre est à peu près 73 Ω: aux extrémités, elle atteint généralement quelques milliers d'ohms.

Si nous représentons dorénavant les distributions de courant et de tension le long de l'antenne seulement à l'instant où le courant a sa valeur maximale, nous obtenons lesdites distributions et les diagrammes de rayonnement appropriés pour des antennes de longueur $\frac{\lambda}{2}$, λ , $\frac{3\lambda}{4}$, 3λ : ces diagrammes sont représentés à la figure 2.8. Notons que plus l'antenne est longue, plus le nombre de lobes augmente et plus elle est directionnelle, c'est-à-dire rayonnant plus fort dans certaines directions que dans d'autres.

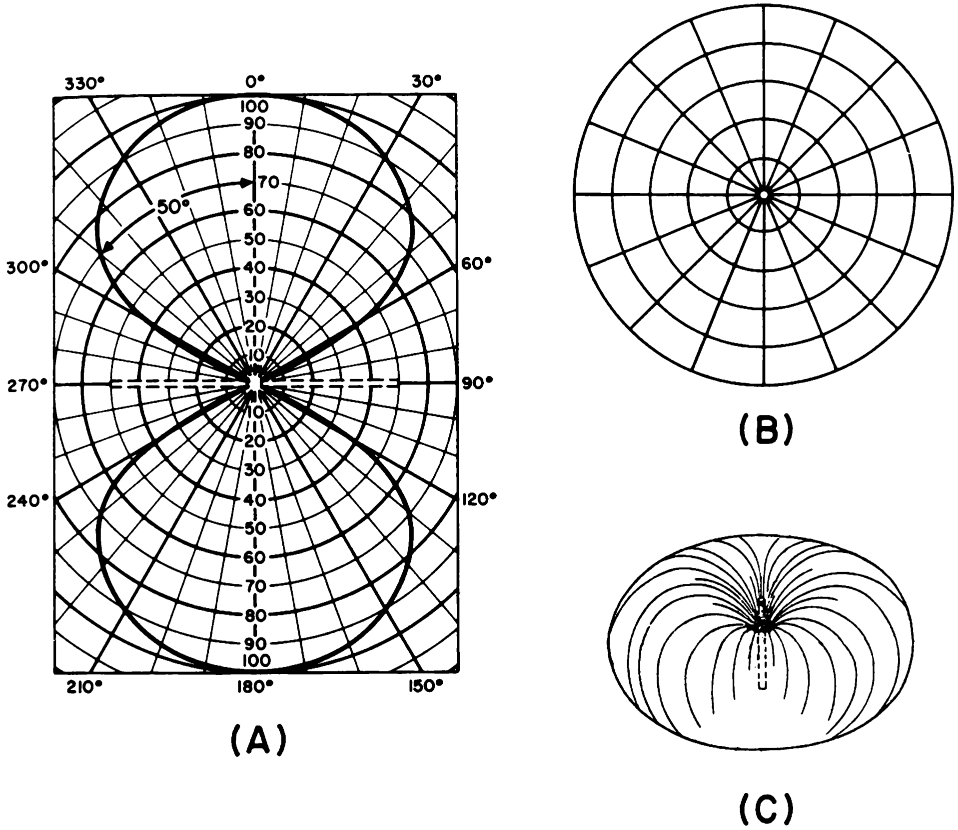


Fig. 2.6. Diagramme de rayonnement polaire d'un dipôle demi-longueur d'onde.
A. Dans un plan passant par le dipôle.
B. Dans un plan perpendiculaire au dipôle.
C. Enveloppe du diagramme de rayonnement.

Document "Radio Fondamentals". Reproduit, Ministre A.S.C.

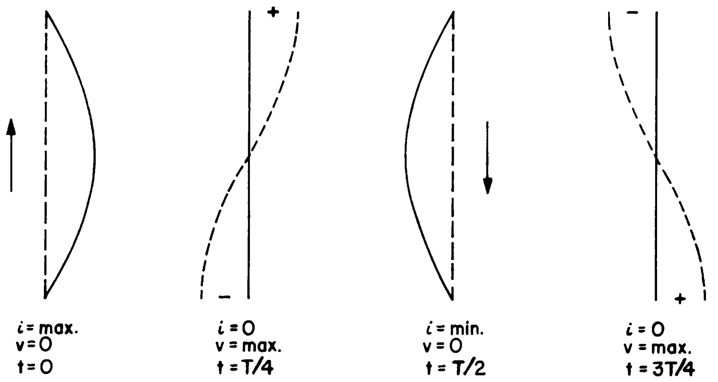


Fig. 2.7. Distribution du courant et de la tension dans un dipôle demi-longueur d'onde à 4 instants d'un cycle de période T = 1/f.

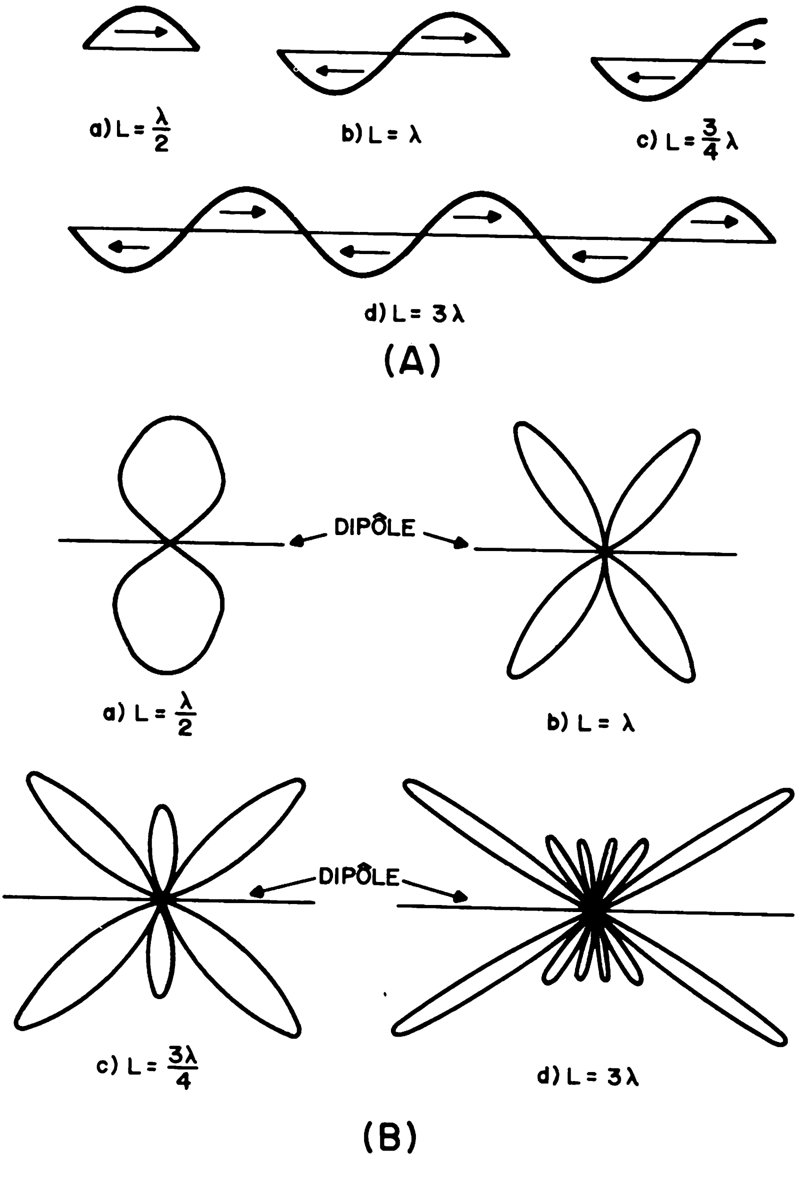


Fig. 2.8. A. Distribution du courant dans des dipôles résonnants.
B. Diagramme de rayonnement de dipôles résonnants.

Une antenne non résonnante peut cependant servir à émettre. L'émission se ferait avec moins d'efficacité car la puissance rayonnée serait faible du fait de la distribution des courants et des tensions bien différente de celle qui, rappelons-le, déterminait des points d'amplitudes minimales à des endroits clef le long de l'antenne résonnante.

Afin d'obtenir une antenne résonnante, il suffit de choisir la longueur adéquate: soit une demi-longueur d'onde $\lambda/2$, soit un multiple de celle-ci; plus l'antenne sera courte et plus grande sera la fréquence de résonance. L'impédance d'une antenne résonnante est ohmique car les réactances capacitives et inductives s'annulent; cependant, si une antenne est plus courte que $\lambda/2$, elle peut être considérée comme étant trop peu inductive. L'on y remédie en associant en série une inductance. Quand l'antenne est plus longue que $\lambda/2$, elle se comporte comme un circuit inductif et l'on y remédie en associant en série une capacité afin de rendre l'antenne résonnante (fig. 2.9). Si l'on associe une inductance et une capacité variables, on peut obtenir la résonance de l'antenne sur une large gamme de fréquences.

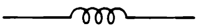
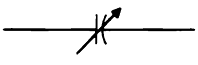
A		AJOUTER UNE INDUCTANCE EN SÉRIE À L'ANTENNE REVIENT À ALLONGER L'ANTENNE
B		AJOUTER UNE CAPACITÉ EN SÉRIE À L'ANTENNE REVIENT À RACCOURCIR L'ANTENNE
C		UNE INDUCTANCE ET UNE CAPACITÉ VARIABLES EN SÉRIE AVEC L'ANTENNE PERMETTENT D'OBTENIR LA RÉSONANCE POUR UNE GRANDE GAMME DE FRÉQUENCES

Fig. 2.9. Les moyens d'atteindre la résonance avec une antenne dont la longueur diffère de la demi-longueur d'onde $\lambda/2$ ou d'un multiple de celle-ci.

L'antenne non résonnante peut être utilisée efficacement comme antenne unidirectionnelle si elle est connectée à la terre via une résistance R: la distribution de courant et de tension est alors identique, étant donné que la terre conserve toujours un potentiel nul (figure 2.10). Cependant, une partie non négligeable de l'énergie électrique se dissipe sous forme de chaleur dans la résistance.

3. EFFET DU SOL

La terre agit comme miroir pour toute antenne et rayonne aussi: ce qui fait qu'il faut considérer deux antennes rayonnantes et non pas une seule, comme il a été précédemment fait en analysant l'antenne de Hertz.

Une antenne qui serait connectée à la base au sol serait en fait prolongée: **l'antenne de Marconi** d'une longueur $\lambda/4$ est connectée à la terre: son diagramme de rayonnement devient alors identique à celui de l'antenne de Hertz, excepté pour la réception; cette dernière n'est possible qu'au-dessus du sol (figure 2.11).

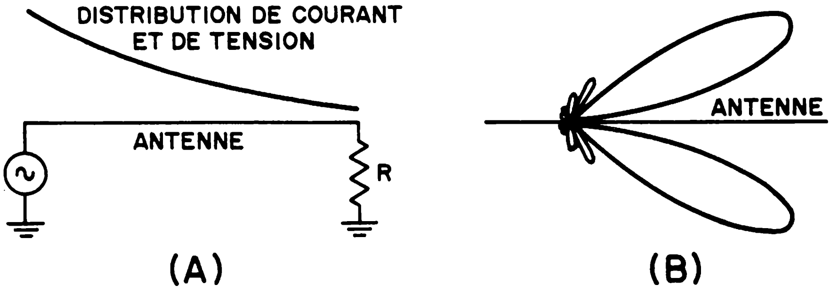


Fig. 2.10. Antenne non résonnante.
A. Distribution de voltage et de courant le long de l'antenne.
B. Diagramme de rayonnement.

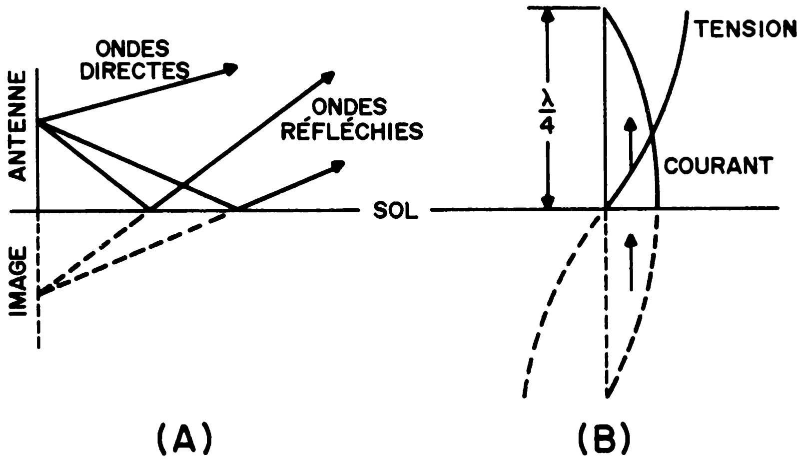


Fig. 2.11. L'antenne Marconi.
A. L'antenne et son image.
B. Distribution de courant et de tension le long de l'antenne.

Si l'antenne n'est pas connectée à la terre, mais se trouve à des hauteurs différentes, le diagramme de rayonnement est considérablement modifié: La figure 2.12 représente les diagrammes de rayonnement d'un même dipôle demi-longueur d'onde horizontale, à différentes hauteurs h du sol.

La figure 2.13 présente les diagrammes de rayonnement obtenus au moyen d'antennes verticales de longueurs différentes, connectées à la terre. Il reste que l'antenne de Marconi est la plus efficace (figure 2.13). Dans la mesure où une longueur d'antenne $\lambda/4$ est difficile à réaliser, comme c'est le cas enVLF, on ajoute une portion horizontale au sommet de l'antenne (figures 2.14 et 2.15) dont l'effet est d'augmenter le courant à la base de l'antenne et de permettre un meilleur rayonnement; l'antenne est dite alors **antenne en nappe.** La portion horizontale de l'antenne crée une polarisation horizontale, mais qui est souvent annulée en raison de la proximité de la terre.

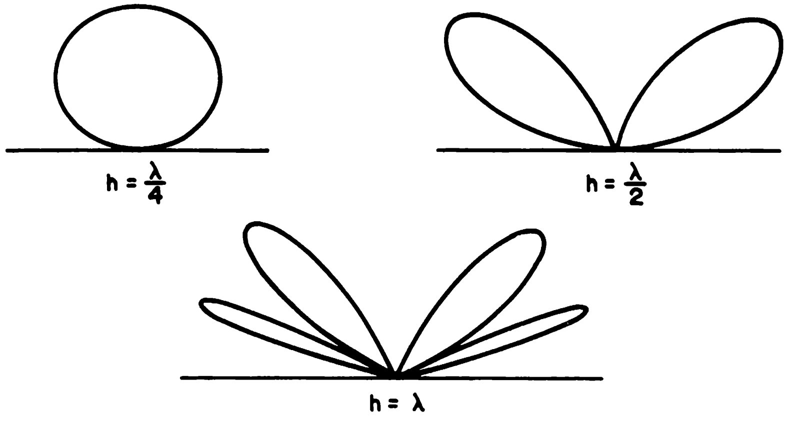


Fig. 2.12. Diagrammes de rayonnement d'un dipôle demi-longueur d'onde situé à différentes hauteurs h au-dessus du sol.

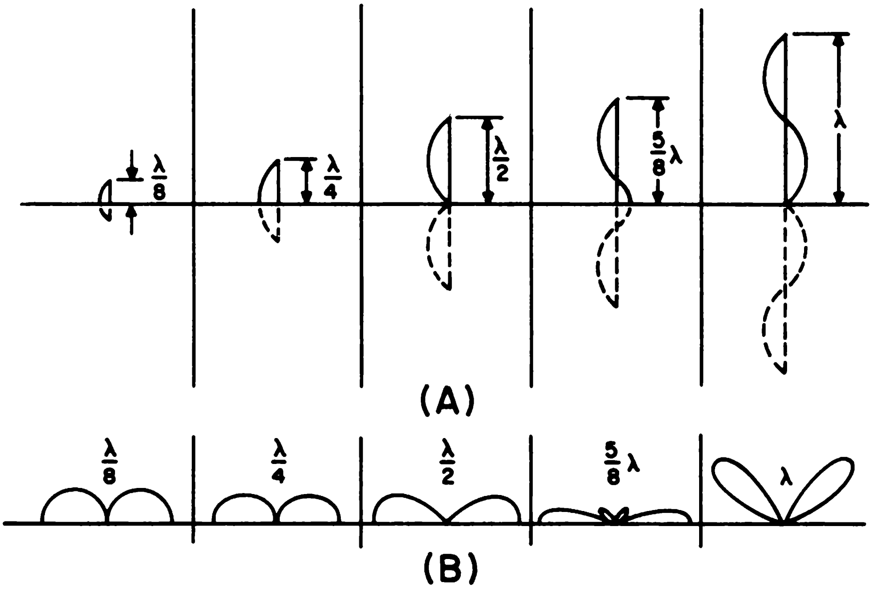


Fig. 2.13. Caractéristiques d'antennes verticales connectées à la terre.
A. Longueurs et distributions de courant.
B. Diagrammes de rayonnement.

Les cas précédemment traités supposent un sol de très bonne conductivité. Dans le cas contraire, une terre artificielle très conductrice est créée au moyen d'un grand nombre de "rayons" horizontaux d'une longueur au moins égale à $\lambda/4$ ou, de préférence, à $\lambda/2$ s'étendant à partir de la base de l'antenne et formant une excellente couche conductrice. Ces rayons (jusqu'à 120 parfois) sont placés sous terre à 25 cm de profondeur environ.

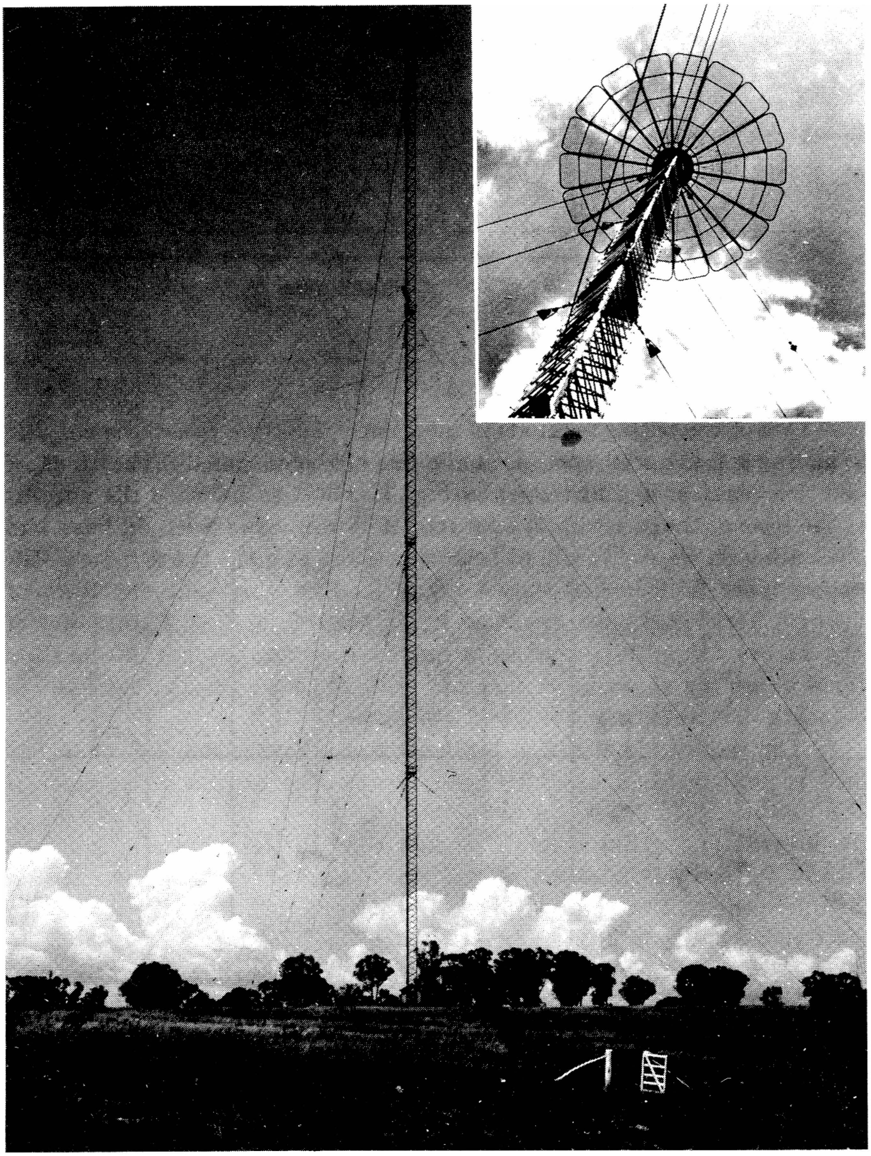


Fig. 2.14. Antenne en nappe VLF.

(Document Mc Graw-Hill)

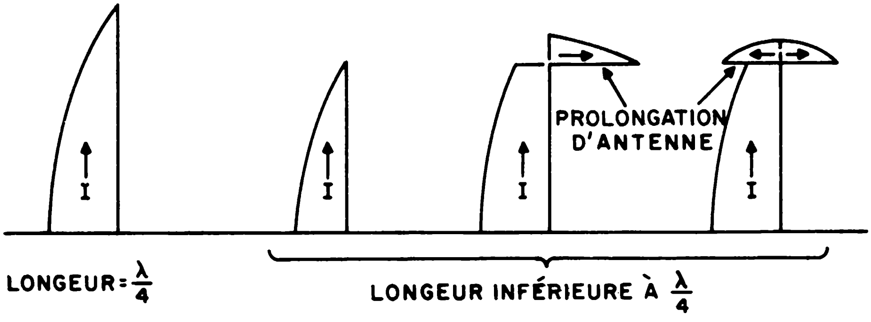


Fig. 2.15. Distribution de courant dans une antenne en nappe.

4. ALIMENTATION D'UNE ANTENNE

L'antenne peut être alimentée électriquement de différentes façons et en différents endroits: un amplificateur électrique de puissance peut être directement branché à l'antenne au moyen de lignes de transmission parallèles, de câbles coaxiaux ou de guides d'onde; ces moyens d'alimentation sont souvent dénommés **feeders**. La principale considération en jeu est celle de l'adaptation d'impédance, entre l'impédance de l'antenne, l'impédance de la ligne de transmission utilisée et l'impédance existant aux bornes de l'émetteur ou du récepteur. Toutes ces impédances doivent être, si possible, égales afin que la presque totalité de la puissance électrique soit transmise à l'antenne pour rayonnement dans le cas d'émission ou transmise aux bornes du récepteur pour amplification dans le cas de réception.*

a) **L'alimentation directe** est parfois utilisée, et le plus souvent par couplage d'un circuit électrique résonnant, à la fréquence d'émission ou de réception (figure 2.16).

Le transformateur L_1, dans la figure 2.16, permet d'adapter l'impédance de l'amplificateur de puissance à celle de l'antenne grâce au rapport des spires de ses inductances. L_2 est une inductance variable, C_1 une capacité variable. L'un des deux éléments, L_2 ou C_1, doit être court-circuité pendant que l'autre est ajusté pour obtenir une antenne résonnante. Des techniques de couplage plus réussies existent: elles seront présentées ultérieurement.

Dans les circuits de couplage de l'antenne, on peut souvent trouver une inductance désignée par RFC (Radio Frequency Choke); il en est ainsi entre l'antenne et la terre. Le rôle de cette inductance vise à décharger l'antenne des charges électrostatiques accumulées. Elle n'a aucun effet sur la résonance et n'affecte que les plus basses fréquences.

* *Les signaux captés par les antennes sont en général très faibles, d'un ordre de grandeur de quelques microvolts seulement.*

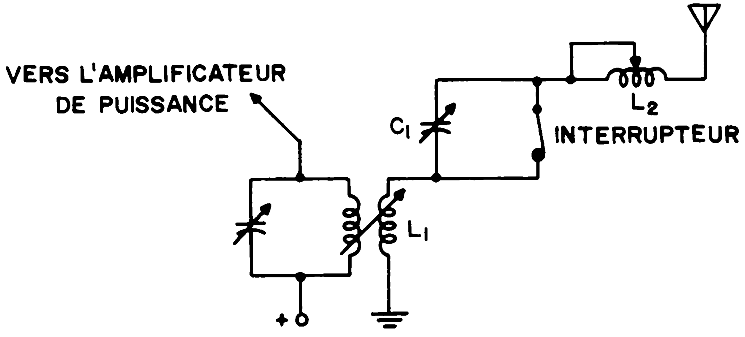


Fig. 2.16. Exemple de couplage direct d'antenne.

b) **Des lignes de transmission parallèles** proches permettent de véhiculer la puissance électrique sans rayonnement. Le champ électrique créé par l'une annule le champ électrique créé par l'autre (le sens du courant dans les deux lignes est opposé).

Des lignes résonnantes sont utilisées et branchées au centre ou à l'extrémité du dipôle demi-longueur d'onde (figure 2.17) selon l'impédance de l'antenne en ces points.

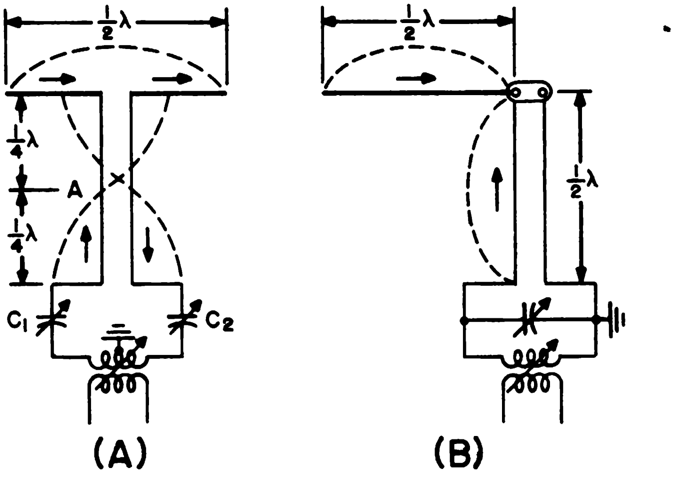


Fig. 2.17. Alimentation d'antenne via des lignes parallèles résonnantes (de longueur λ/2). Les lignes pointillées indiquent la distribution du courant.

c) Des lignes non résonnantes sont aussi utilisées et peuvent être adaptées par des **lignes en delta** (figure 2.18A). Dans le cas de couplage en delta, l'on utilise des lignes de transmission dont l'impédance est 600 ohms. L'impédance de l'antenne croît avec l'écartement existant entre les points de branchement (figure 2.18B).

L'écartement est déterminé par les formules suivantes (ℓ étant la longueur de l'antenne):

$$A = 0{,}25\,\ell$$

$$B = 0{,}32\,\ell \qquad (2\text{-}3)$$

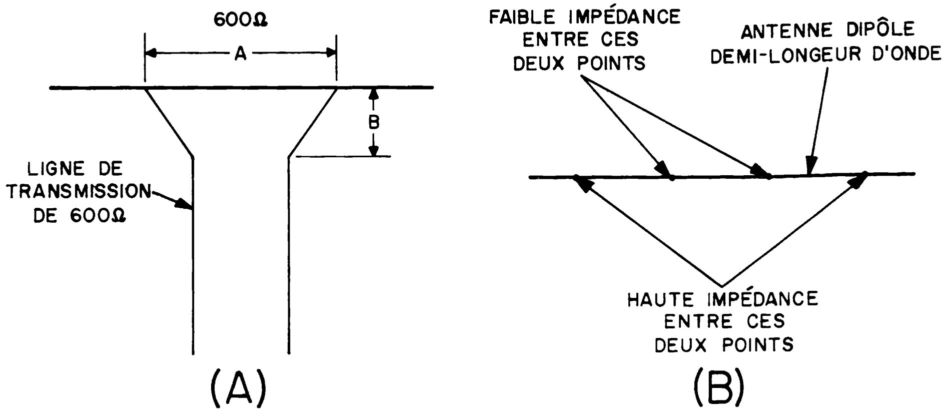


Fig. 2.18. A. Couplage en delta d'antenne via une ligne de transmission non résonnante.
B. L'impédance du dipôle demi-longueur d'onde croît avec l'éloignement du centre.

Exemple: une antenne choisie pour émettre à 7100 kHz aura une longueur:

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f} = \frac{3{,}10^8}{2 \times 7{,}1 \times 10^6} = 21{,}1 \text{ m}$$

L'écartement des points d'attache A sera: $A = 21{,}1 \times 0{,}25 = 5{,}27$ m

et la hauteur du delta B sera: $B = 21{,}1 \times 0{,}32 = 6{,}75$ m

d) Grâce à un simple conducteur se trouvant à une distance approximative de λ/6 de l'extrémité de l'antenne, nous pouvons aussi nous connecter à l'antenne (figure 2.19).

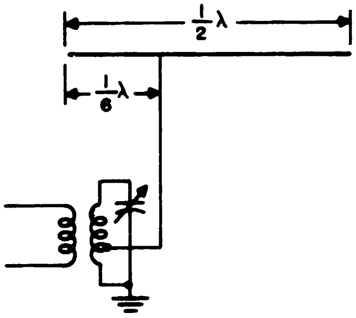


Fig. 2.19. Couplage d'antenne au moyen d'un simple fil électrique.

e) **Les câbles coaxiaux** sont des câbles concentriques, l'extérieur étant branché à la terre, l'intérieur directement branché à l'antenne (fig. 2.20). Dans la figure 2.20A, l'antenne est montée à même le sol; dans la figure 2.20B, elle est montée sur un support isolant.

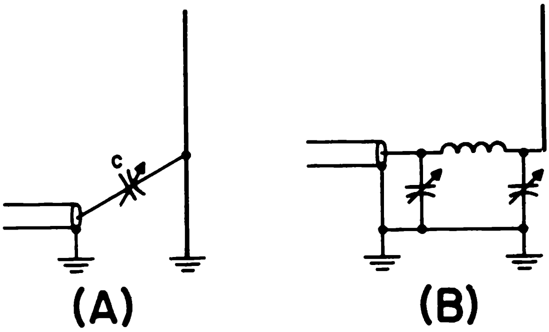


Fig. 2.20. Alimentation d'antenne verticale via câble coaxial.

f) Les **guides d'ondes** sont des cavités métalliques où les ondes rayonnantes se propagent par diverses réflexions avant d'être émises à l'extérieur. Les guides d'onde sont utilisés pour les ondes centimétriques et permettent un contrôle parfait de la polarisation de l'onde. Ils sont utilisés comme feeders pour des antennes à écran réflecteur parabolique que nous présenterons par la suite.

B- PARAMÈTRES D'UNE ANTENNE

Une antenne peut être caractérisée par différents paramètres: son diagramme de rayonnement, sa polarisation, sa résistance, sa bande passante, sa largeur de faisceau, son gain en directivité et en puissance, sa longueur effective et sa hauteur effective. Nous envisagerons successivement tous ces paramètres.

1. RESISTANCE D'ANTENNE

La résistance d'une antenne est un facteur essentiel à connaître parce qu'il permet d'adapter celle-ci à la résistance d'entrée de l'émetteur et assurer ainsi un transfert maximal d'énergie.

Une puissance électrique fournie à une antenne sera d'une part perdue en échauffement résultant de la résistance ohmique de l'antenne et, d'autre part, traduite en rayonnement électromagnétique. Nous pourrons donc considérer la résistance totale de l'antenne comme étant composée de deux résistances en série: la résistance ohmique r et la résistance de rayonnement R. Une antenne sera d'autant plus efficace que le rapport R/r sera grand.

2. COEFFICIENT D'EFFICACITE D'UNE ANTENNE

Le coefficient d'efficacité d'une antenne η est défini par le rapport:

$$\eta = \frac{R}{r + R} \qquad (2\text{-}4)$$

En pratique, l'efficacité d'une antenne peut atteindre 75 à 95% .

La résistance ohmique de l'antenne tient compte de la résistance de l'antenne, des pertes causées par la présence d'objets métalliques à proximité de l'antenne où des courants sont induits, des effets de décharge et de corona.*

La résistance de rayonnement R pourrait être définie comme la résistance qui dissiperait une énergie électrique égale à l'énergie rayonnée; ou bien comme étant le rapport:

$$R = \frac{\text{Puissance émise par l'antenne}}{(\text{Courant maximal au point d'alimentation})^2}$$

* *L'effet corona se manifeste au voisinage de tout conducteur sous haute tension sous forme l'une luminescence due à la recombinaison d'atomes ionisés par les champs électriques existants.*

Dans le cas d'une antenne dont la longueur ℓ est plus petite que $\lambda/4$, la résistance de rayonnement s'obtient en appliquant la formule:

$$R = 80\ \pi^2 \left(\frac{\ell}{\lambda}\right)^2 \qquad (2\text{-}5)$$

Ainsi, pour un rapport $\frac{\ell}{\lambda} = \frac{1}{10}$, nous obtenons une résistance de 7,8 Ω, valeur qui est vérifiée dans la pratique.

La résistance de rayonnement d'un dipôle demi-longueur d'onde a été présentée précédemment comme étant égale à 73 Ω; cette valeur est celle d'une antenne faite d'un fil infiniment fin; en réalité, cette résistance diminue en même temps que le diamètre de l'antenne "d" augmente. Le tableau 1 montre la variation de la résistance de rayonnement en fonction du rapport $\lambda/2d$.

TABLEAU 1

$\frac{\lambda}{2d}$	50	60	70	100	200	400	1 000	3 000	10 000	100 000	∞
Résistance de rayonnement d'une demi-onde en Ω	56	58	59	60	61	62	62,8	64	65	67	73

Pour un rapport $\frac{\lambda}{2d}$ égal à 10 000, elle tombe à 65 Ω.

Pour un rapport $\frac{\lambda}{2d}$ égal à 50, elle n'est plus que de 56 Ω.

La résistance de rayonnement considérée jusqu'ici ne tenait pas compte de l'effet du sol. Le graphique 2.18 indique les variations de la résistance de l'antenne demi-onde à diverses hauteurs du sol, supposé parfaitement conducteur; on suppose un fil d'antenne infiniment fin. S'il n'est en est pas ainsi, on appliquera les corrections indiquées précédemment par le rapport $\lambda/2d$ (tableau 1). Dans le cas de l'antenne verticale, les variations sont insignifiantes alors que pour l'antenne horizontale, la résistance de rayonnement oscille autour de la valeur moyenne qui est celle de l'antenne isolée dans l'espace (73 Ω). Elle atteint cette valeur pour des hauteurs d'antennes multiples de $\lambda/4$.

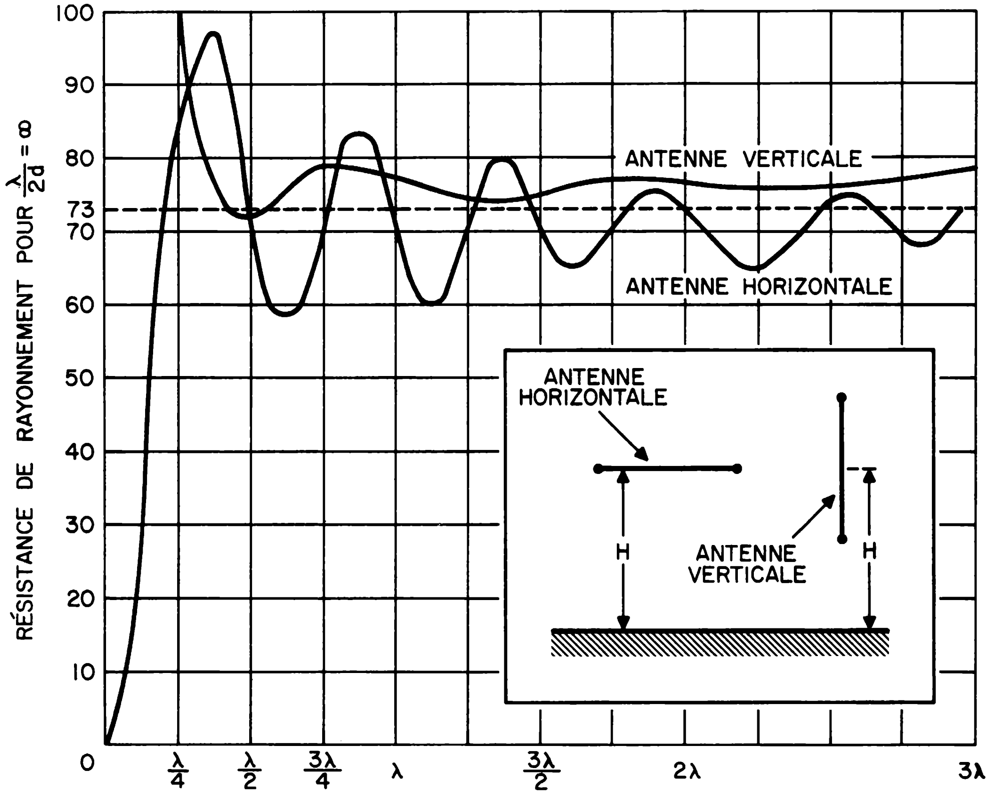


Fig. 2.21. Variation de la résistance de rayonnement avec la hauteur au-dessus du sol.

3. IMPEDANCE D'UNE ANTENNE

Dans une antenne résonnante, l'impédance d'entrée est, nous l'avons vu, purement résistive; elle devient inductive ou capacitive, selon que la longueur de l'antenne est plus longue ou plus courte que la longueur de résonance λ/2. La figure 2.22 présente l'impédance de l'antenne Z pour des antennes de diverses longueurs. L'impédance Z est, rappelons-le, la somme vectorielle de la résistance d'entrée R et de la réactance d'entrée X.

$$Z = R + jX$$

j étant un nombre imaginaire tel que $j^2 = -1$.

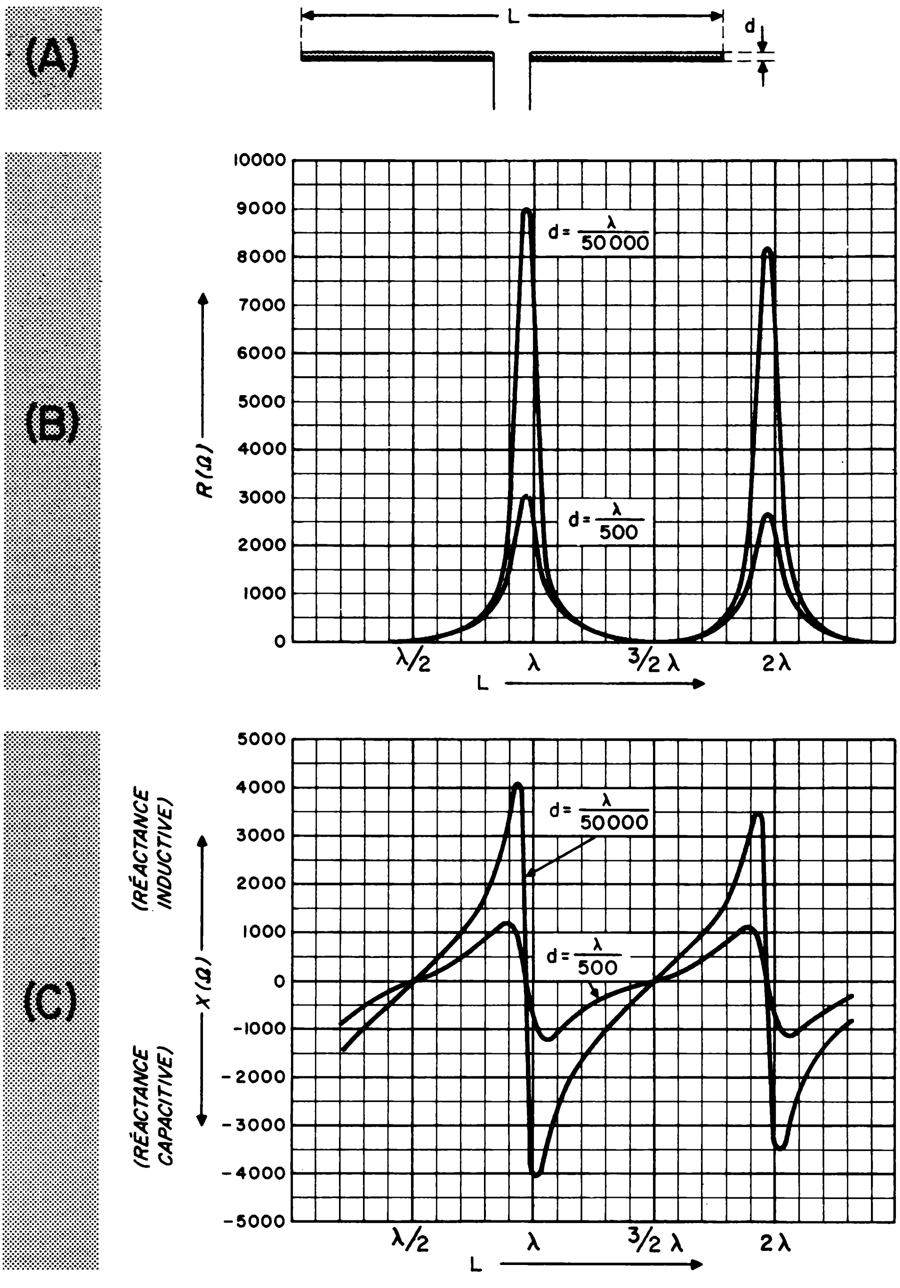


Fig. 2.22. Variation de la résistance et de la réactance d'une antenne en fonction de sa longueur.

L'antenne est en résonance pour des longueurs ℓ multiples de $\lambda/2$; dans la pratique, il y a résonance pour des longueurs légèrement inférieures aux valeurs indiquées; en outre, ces valeurs dépendent aussi, quoique légèrement, du diamètre d.

Pour des valeurs de ℓ égales à λ, 2λ, ...$n\lambda$, la valeur de R se fait de plus en plus élevée et l'émission est donc beaucoup plus faible (voir fig. 2.25).

4. BANDE PASSANTE D'UNE ANTENNE

La bande passante d'une antenne est le domaine des fréquences pour lesquelles son opération est satisfaisante. Si nous plaçions un dipôle dans un champ électromagnétique homogène, dont l'intensité reste constante, mais dont la fréquence (et donc également la longueur d'onde) varie, la tension induite E^2 dans l'antenne dipôle est maximale pour une longueur d'onde $\lambda/2$; si la fréquence est augmentée ou diminuée, la tension induite diminue ainsi que l'indique la figure 2.23A.

Par définition, la bande passante est la différence de fréquences $(f_1 - f_2)$ pour lesquelles la tension E_R descend à 0,7 (3 dB) de sa valeur maximale (voir figure 2.23A).

Une antenne de diamètre plus épais implique une courbe de résonance plus large (fig. 2.23B). Dans la mesure où nous sommes intéressés par une large bande passante autour d'une fréquence centrale, nous aurons recours à d'autres moyens que nous envisagerons par la suite.

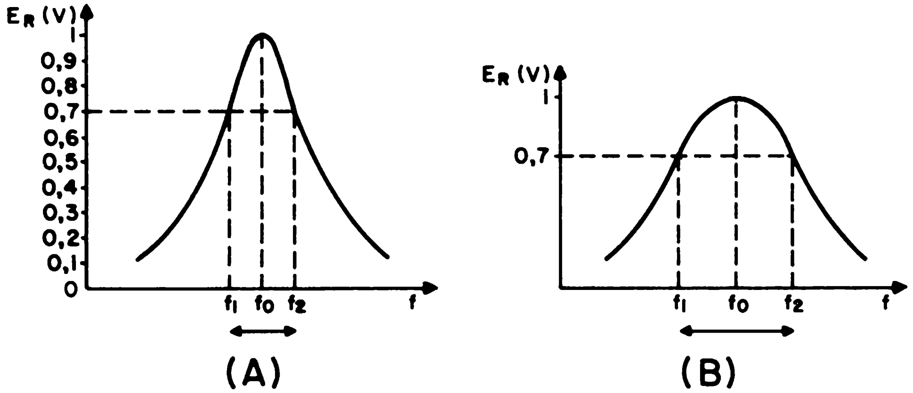


Fig. 2.23. Bande passante d'une antenne.
A — pour un faible diamètre d'antenne,
B — pour un plus gros diamètre d'antenne.

5. LARGEUR DE FAISCEAU D'UNE ANTENNE

Pour une antenne directionnelle, la largeur de faisceau – ou l'ouverture angulaire – est définie comme l'angle existant entre les points dont la densité de puissance de rayonnement est égale à la moitié de la puissance de rayonnement maximale: c'est aussi la séparation angulaire correspondant à une atténuation d'intensité de 3 dB sur le diagramme de rayonnement de l'antenne (fig. 2.24). Cette définition s'applique le plus fréquemment au lobe principal de l'antenne directionnelle.

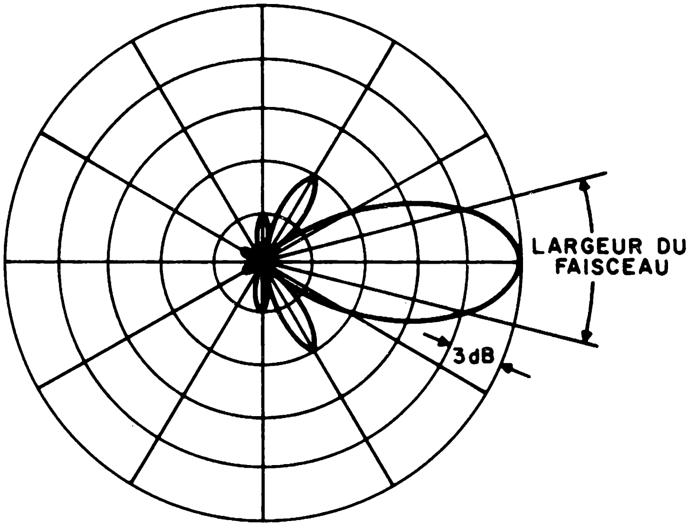


Fig. 2.24. Longueur de faisceau d'une antenne.
Dans cet exemple, la largeur de faisceau est 30°.

6. GAIN DE DIRECTIVITE D'UNE ANTENNE

Ce paramètre se rattache aux antennes directionnelles, la puissance émise dans la direction du lobe principal étant beaucoup grande que dans toute autre direction. Le gain de directivité s'obtient en établissant le rapport suivant.

$$\frac{\text{Densité de puissance dans la direction du lobe principal}}{\text{Densité de puissance qui aurait existé dans une antenne isotropique*}}$$

et ce, pour une même puissance d'émission d'antenne.

* *Une antenne isotropique émet des puissances égales dans toutes les directions.*

Le tableau 2 présente les gains de directivité relatifs à une antenne isotropique pour des longueurs d'antennes différentes. Le gain de directivité augmente avec la longueur d'antenne (voir figure 2.6B).

TABLEAU 2	
GAIN DE DIRECTIVITE D'UNE ANTENNE (relatif à une antenne isotropique)	
Longueur d'antenne en λ	Gain de directivité (antenne résonnante)
0,5	1,65
1	1,8
1,5	2
2	2,3
3	2,8
4	3,5
8	7,1
Le gain de directivité du dipôle élémentaire est de 1,5.	

La figure 2.25 indique les variations de gain de directivité relatives à des antennes résonnantes.

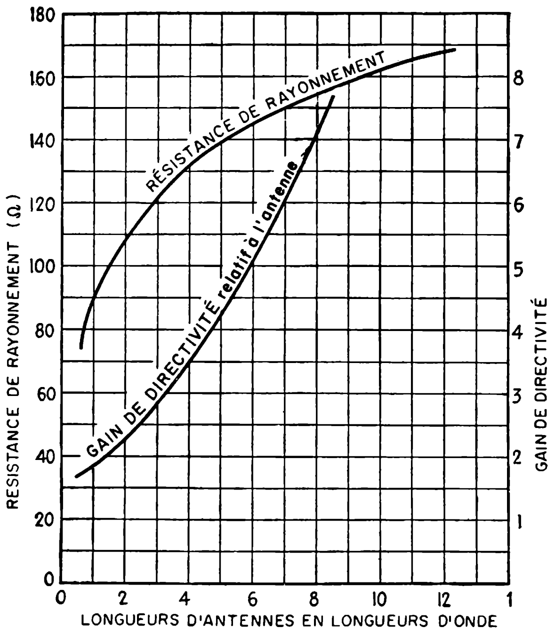


Fig. 2.25. Résistance de rayonnement et gain de directivité d'antennes résonnantes de différentes longueurs.

7. GAIN DE PUISSANCE D'UNE ANTENNE (figure 2.25).

Le gain de puissance d'une antenne se définit comme le rapport de la puissance rayonnante qui doit être émise par une antenne isotropique afin de créer une certaine intensité de champ à un certain point, à la puissance électrique qui doit être fournie à l'antenne directionnelle afin de développer la même intensité de champ à la même distance, dans la direction de rayonnement maximal. Cette définition établit un rapport entre une énergie rayonnante et une énergie électrique et tient compte donc des pertes ohmiques de l'antenne.

Les deux définitions précédentes, gain de puissance et gain de directivité d'une antenne, sont sensiblement pareilles. Seule la première tient compte cependant des pertes ohmiques.

Si l'on désigne le gain de directivité par D et le gain de puissance par G, nous aurons:

$$G = \eta D \qquad (2\text{-}6)$$

η étant le coefficient d'efficacité de l'antenne ($\eta = 1$ pour l'antenne sans perte).

Ces deux gains sont pratiquement identiques pour les antennes VHF et UHF.

Exemple: Un émetteur de puissance 1000 watts émet au moyen d'une antenne dont le coefficient d'efficacité est 0,95 et le gain de directivité 3. Quel est son gain de puissance ?

Le gain de puissance correspondant est:

$$G = \eta D = 0{,}95 \times 3 = 2{,}85$$

La puissance électrique P_e est 1000 W; la puissance rayonnée P_t est ηP_e soit 0,95 x 1000 = 950 W. La densité de puissance de rayonnement dans la direction du lobe principal est 3 fois plus élevée que celle d'une antenne isotropique dont la puissance de rayonnement est 950 W. Ceci revient à dire que la puissance de rayonnement effective dans la direction du lobe principal est 3 fois plus grande que dans le cas d'une antenne isotropique, soit 3 x 950 = 2850 W.

8. LONGUEUR EFFECTIVE D'UNE ANTENNE

En pratique, l'antenne se conduit différemment de sa longueur physique: sa longueur effective est légèrement plus grande que sa longueur physique; l'antenne opposant toujours une certaine résistance au passage du courant, la longueur d'onde dans l'antenne est plus courte que celle d'une onde propagée dans l'espace, compte tenu de la différence de vitesse de propagation de l'onde dans le conducteur et dans l'espace. Elle est exprimée par la relation:

$$\lambda_e = \frac{c}{f} \times 0{,}94$$

pour les fréquences inférieures à 30 MHz.

En d'autres termes, cette nouvelle longueur d'onde λ est approximativement de 6% plus courte que la longueur d'onde supposée: $\lambda = \frac{c}{f}$

Il faudra donc construire des antennes dipôles demi-longueur d'onde légèrement plus courtes, afin d'obtenir la résonance d'antenne.

Exemple: Trouver la longueur d'un dipôle destiné à fonctionner sur 8 MHz.

$$\ell_e = \frac{\lambda_e}{2} = \frac{c}{2f} \times 0{,}94 = \frac{3.10^8}{8.10^6} \times 0{,}94 = 17{,}6 \text{ m}$$

soit 8,8 m pour chaque branche du dipôle.

Au-dessus de 30 MHz, il faut tenir compte du diamètre de l'antenne et appliquer la relation suivante:

$$\ell_e = \frac{\lambda_e}{2} = \frac{c}{2f} \times k \qquad (2\text{-}7)$$

où k désigne le coefficient de raccourcissement donné par le graphe 2.26.

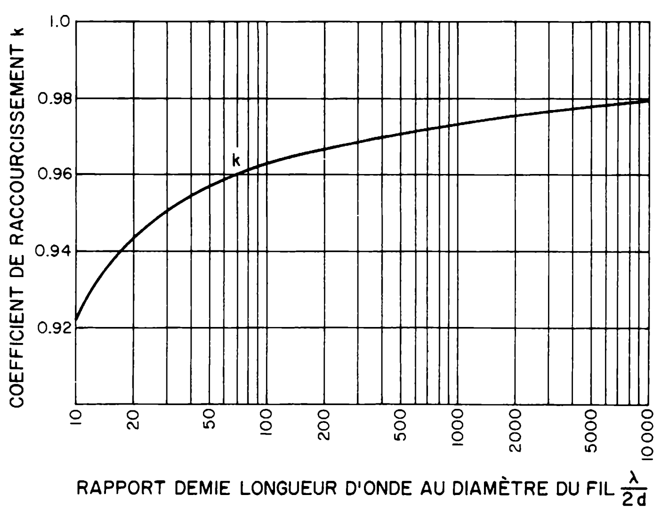


Fig. 2.26. Effet du diamètre de l'antenne sur la longueur effective. Le coefficient k multiplie la demi-longueur d'onde théorique.

Exemple: Trouver la longueur d'une antenne demi-longueur d'onde destinée à fonctionner à 38,7 MHz, sachant que l'antenne a un diamètre de 1,27 cm.

A la fréquence 38,7 MHz correspond la longueur d'onde:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.10^8}{38{,}7.10^6} = 7{,}75 \text{ m}$$

Le rapport demi-longueur d'onde diamètre est donc:

$$\frac{\lambda}{2d} = \frac{7{,}75}{2 \times 1{,}27.10^{-2}} = 305$$

A cette valeur correspond le coefficient k $\approx$ 0,97 (figure 2.26).

Utilisant (2-7), la longueur de l'antenne sera donc:

$$\ell_e = \frac{c}{2f} \times k = \frac{7{,}75}{2} \times 0{,}97 = 3{,}75 \text{ mètres}$$

Souvent, l'antenne peut vibrer sur la fréquence de résonance, mais aussi sur une harmonique de cette fréquence, c'est-à-dire une série de fréquences multiples de la fréquence de résonance. Nous reviendrons plus tard sur le fait que chaque émission sur une certaine fréquence s'accompagne d'harmoniques désignées par harmonique 1, harmonique 2, etc..., qui sont des fréquences égales à la fréquence d'émission — dite fréquence fondamentale — multipliées respectivement par 1, 2, etc ...*

Les longueurs effectives correspondantes sont alors données approximativement par la formule:

$$L_e = 150 \times \frac{(n - 0{,}05)}{f} \qquad (2\text{-}8)$$

n est le nombre de demi-longueur d'onde de l'harmonique

f est la fréquence en MHz

L_e est donné en mètres

* *Dans certains cas, l'harmonique, quoique de faible puissance, se propage beaucoup mieux que la fréquence fondamentale et perturbe ainsi d'autres émissions.*

Le tableau 3 donne la formule simplifiée pour les différentes valeurs usuelles de n, et pour une valeur k égale à 0,95.

TABLEAU 3
Longueurs effectives correspondant aux différentes harmoniques

n = 1	n = 2	n = 4	n = 8
$L = \frac{142,5}{f}$	$L = \frac{292,5}{f}$	$L = \frac{592,5}{f}$	$L = \frac{1\,192,5}{f}$

Exemple: Si un cristal produit une fréquence de 7,1 MHz, la demi-longueur d'onde sera:

$$L = \frac{142,5}{7,1} = 20,07 \text{ m}$$

Ce cristal donne une harmonique 2 de fréquence 14,2 MHz alors que notre antenne vibre sur une fréquence de:

$$\frac{292,5}{20,07} = 14,573 \text{ MHz}$$

(L'antenne qui vibrerait sur l'harmonique 2 de la fréquence aurait pour longueur:

$$L = \frac{292,5}{14,2} = 20,6 \text{ mètres environ})$$

9. HAUTEUR EFFECTIVE D'UNE ANTENNE

La hauteur effective est une caractéristique propre de l'antenne, non reliée à la longueur du mât qui la porte. Pour l'antenne dipôle demi-longueur d'onde, la hauteur effective d'antenne est:

$$h_e = \frac{\lambda}{\pi} \qquad (2\text{-}9)$$

Si λ = 3,2 mètres (longueur d'onde moyenne utilisée en modulation de fréquence FM), on a:

$$h_e = \frac{3,2}{3,14} = 1,02 \text{ mètre}$$

La hauteur effective détermine la tension V induite dans une antenne par un champ électromagnétique d'intensité E selon la relation:

$$V = E \times h_e \qquad (2\text{-}10)$$

V est la tension induite en Volts

E est l'intensité du champ électrique en Volts/mètre

h_e est la hauteur effective en mètres

Exemple: Si l'intensité du champ à la proximité d'une antenne demi-longueur d'onde émettant en MF sur 0,88 MHz est de 1 mV/m, quelle est la tension induite ? Si la puissance de l'émetteur est 1000 V, de combien devrait-on augmenter la puissance de l'émetteur afin de capter une tension induite double ?

A la fréquence d'émission correspond la longueur d'onde:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.10^8}{0,88\ .10^6} = 340,9 \text{ mètres}$$

La hauteur effective correspondante est:

$$h_e = \frac{\lambda}{\pi} = 108,5 \text{ m}$$

La tension induite V est donc égale à:

$$V = E \times h_e = 10^{-3} \times 108,5 = 0,1 \text{ volt}$$

La puissance moyenne de rayonnement étant proportionnelle au carré de l'intensité du champ, vouloir doubler la tension induite correspondrait à doubler l'intensité de champ E et donc à multiplier la puissance émise par 4.

$$P = 4 \times 1000 = 4000 \text{ Watts}$$

10. RECAPITULATION DES PROPRIETES DES PARAMETRES D'ANTENNES

Récapitulons les propriétés envisagées pour les différents paramètres d'antennes:

La résistance d'une antenne est composée de sa résistance ohmique r et de sa résistance de rayonnement R . Son efficacité η est donnée par la relation:

$$\eta = \frac{R}{R + r}$$

La résistance de rayonnement augmente avec le rapport $\frac{\lambda}{2d}$ (d étant le diamètre de l'antenne) et elle est influencée par la hauteur de l'antenne par rapport au sol.

Pour les antennes dont la longueur est inférieure à $\lambda/4$, la résistance d'antenne est donnée par la relation: $R = 80\,\pi^2\,(\ell/\lambda)^2$. (2-5)

L'impédance de l'antenne vue à partir du point d'alimentation est résistive pour des longueurs d'antenne multiples de $\lambda/2$: environ 70 Ω pour l'antenne demi-longueur d'onde. Cette valeur augmente si la longueur d'antenne est un multiple de $\lambda/2$: elle possède une composante réactive si la longueur d'antenne n'est pas un multiple de $\lambda/2$. Une antenne dont la longueur est légèrement plus courte que $\lambda/2$ est capacitive, tandis qu'une antenne dont la longueur est légèrement plus longue que $\lambda/2$ est inductive; d'où les possibilités d'adaptation d'antenne au moyen d'inductance ou de capacité en série.

La bande passante d'une antenne augmente avec le diamètre de celle-ci.

Le gain de directivité D et le gain de puissance G sont reliés par la relation $G = \eta\ D$ (2-6). Ces gains augmentent avec la longueur et la hauteur par rapport au sol de l'antenne et sont plus grands pour les antennes non résonnantes.

La longueur effective d'une antenne est légèrement plus longue que sa longueur d'antenne; au-dessous de 30 MHz, les antennes sont construites de 6% plus courtes que la longueur correspondant à la longueur d'onde de résonance. Au-delà de 30 MHz, nous multiplions cette dernière par un coefficient de raccourcissement k dont la valeur augmente en même temps que le rapport $\lambda/2d$.

La longueur effective des harmoniques accompagnant la fréquence fondamentale est donnée par la relation (2-8):

$$L_e = 150 \times \frac{(n - 0{,}05)}{f}$$

n étant le numéro d'harmonique et f la fréquence en mégahertz.

La hauteur effective h_e d'une antenne détermine la valeur de tension induite V dans cette antenne, selon la relation (2-10) $V = E\,h_e$, E étant l'intensité de champ en V/m dans la région de l'antenne.

EXEMPLE DE RECAPITULATION:

Une antenne de Hertz verticale située à 9 m au-dessus du sol possède un diamètre de 15 mm, un coefficient d'efficacité $\eta = 0{,}9$ et est alimentée électriquement par une puissance de 10 000 watts; la longueur d'antenne est choisie de façon à exploiter optimalement l'antenne émettant sur une fréquence de 100 MHz.

a) Quelle sera la longueur d'antenne adéquate ?

b) Quelle sera l'intensité de champ électrique à une distance de 80 km dans la direction de rayonnement maximal ?

c) Quelle sera la tension induite dans une antenne identique à l'antenne émettrice et située dans la direction de rayonnement maximal à une distance de 200 km ?

d) Si l'harmonique 2 captée à une distance de 200 km induit une tension de 143,2 μV, quelle est son atténuation en dB par rapport à la fréquence fondamentale ?

e) Si l'antenne d'émission est alimentée par câble coaxial adapté recevant un courant de 13 A, quelle est la perte de puissance dans ce câble ?

---

a) La longueur d'antenne adéquate sera:

$$\ell_e = \frac{\lambda}{2} \times k \qquad (2\text{-}7)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.10^8}{10^8} = 3 \text{ m},$$

d'où le rapport: $$\frac{\lambda}{2d} = \frac{1{,}5}{0{,}015} = 100$$

k est donné par le graphe 2.26, soit 0,96

d'où: $$\ell_e = \frac{3}{2} \times 0{,}96 = 1{,}44 \text{ m}$$

b) L'antenne est une antenne dipôle et possède un gain de directivité de 1,64 (tableau 2); le gain de puissance de l'antenne sera donc, d'après (2-6):

$$G = \eta D = 0{,}9 \times 1{,}64 = 1{,}476$$

et la puissance de rayonnement sera:

$$P_t = 10\,000 \times 0{,}9 = 9\,000 \text{ W}$$

A une distance de 80 km, la densité de puissance de rayonnement sera 1,64 fois supérieure à celle d'une antenne isotropique dont la puissance de rayonnement est 9 000 W.

$$p_r = \frac{P_t}{4\pi\,(80.10^3)^2} = \frac{14760}{4\pi\,(80.10^3)^2} = 0{,}183\ \mu\text{W/m}^2$$

L'intensité de champ électrique à une distance de 80 km sera:

$$p_r = \frac{E^2}{120\,\pi} \qquad \text{(relation 2-1)}$$

$$E = \sqrt{p_r \times 120\,\pi} = 8{,}3 \text{ mV/m}$$

c) Pour une distance de 200 km, l'intensité de champ sera:

$$p'_r = \frac{14760}{4\pi\,(200.10^3)^2} = 0{,}029\ \mu\text{W/m}^2$$

$$E' = \sqrt{p'_r \times 120\,\pi}$$

$$= 3{,}32 \text{ mV/m}$$

La hauteur effective de l'antenne h_e est donnée par la relation (2-9):

$$h_e = \frac{\lambda}{\pi} \text{ soit}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.10^8}{10^8} = 3 \text{ m}$$

$$h_e = \frac{3}{\pi} = 0{,}95 \text{ m}$$

La tension induite v sur l'antenne située à 200 km sera: (2-10)

$$v = E \times h_e = 3{,}32 \times 10^{-3} \times 0{,}95$$

$$= 3{,}154 \text{ mV}$$

d) L'atténuation en dB de l'harmonique 2 sera:

$$20 \log \frac{143{,}2 \times 10^{-6}}{3{,}154 \times 10^{-3}} = -26{,}8 \text{ dB}$$

e) Si le câble coaxial est adapté, sa résistance caractéristique est égale à celle de l'antenne. La résistance d'antenne est donnée par le tableau 1: pour un rapport demi-longueur d'onde-diamètre $\frac{\lambda}{2d}$ égal à $\frac{3}{2 \times 15 \times 10^{-3}} = 100$, nous aurons $R = 60\ \Omega$.

L'antenne se trouvant au-dessus du sol, la figure 2.21 montre qu'à une hauteur de 3λ la résistance augmente d'environ 5 Ω par rapport à la résistance moyenne (de 73 à 78 Ω). La résistance d'antenne sera donc:

$$60 \times \frac{78}{73} = 64{,}1\ \Omega$$

Le câble adapté a donc une résistance de 64 Ω et délivre une puissance électrique de 10 kW; le courant délivré est donc:

$$I = \sqrt{\frac{P_e}{R}} = \sqrt{\frac{10^4}{64}} = 12{,}5 \text{ A}$$

Ce câble reçoit donc 13 A et en délivre 12,5 A.

La puissance électrique reçue par le câble est donc:

$$P = R\,I^2 = 64 \times 13^2 = 10\,816 \text{ W}$$

d'où la perte de puissance dans le câble coaxial:

$$10\,816 \text{ W} - 10\,000 \text{ W} = 816 \text{ W}$$

C- DIFFÉRENTS MODÈLES D'ANTENNES

Jusqu'ici, nous avons traité principalement de l'antenne dipôle; dans cette section, nous envisagerons différents types d'antennes: le dipôle replié, les groupements d'antennes, les antennes utilisant des réflecteurs et des directeurs, l'antenne YAGI, l'antenne rhombique, les antennes radars et les antennes spéciales servant à diverses fins (navigation, multibandes, etc...). Nous récapitulerons en spécifiant le genre d'antennes qui convient aux différentes fréquences, soit pour la réception, soit pour l'émission.

1. LE DIPOLE REPLIE

Le dipôle replié (folded dipole) représenté dans la figure 2.27 est constitué par un dipôle ordinaire vibrant en demi-longueur d'onde, auquel on a ajouté un brin de même longueur, à faible distance du dipôle, et dont les extrémités sont reliées électriquement à celles du dipôle.

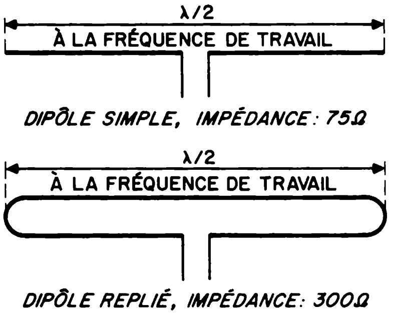


Fig. 2.27. Le dipôle replié.

La distribution de courant dans un dipôle replié est telle que les courants dans chaque brin sont en phase et donc s'ajoutent. En alimentant le dipôle replié par un courant deux fois moindre que celui d'un dipôle simple, nous obtenons le même effet, c'est-à-dire un diagramme de rayonnement identique.

Le dipôle replié se comporte donc comme un dipôle simple dont la résistance de rayonnement R' serait quatre fois plus grande que la résistance R du dipôle simple: la même puissance serait émise, via des courants d'alimentation différents:

$$P = R\,I^2 = R'\left(\frac{I}{2}\right)^2$$

d'où R' = 4 R.

La résistance de rayonnement d'un dipôle replié est donc R' = 4 x 73 Ω = 292 Ω, soit 300 Ω environ; c'est cette valeur d'impédance qu'il faut adapter aux bornes du récepteur.

Les caractéristiques d'une antenne dipôle repliée peuvent être résumées comme suit:

- la résistance d'antenne est plus grande (300 Ω) et plus facile à adapter,
- un même diagramme de rayonnement que le dipôle simple, et donc une sensibilité directionnelle égale,
- la bande passante du dipôle replié est en général beaucoup plus grande. Cette propriété est utilisée dans les antennes de télévision où chaque émission utilise une bande de fréquence de 6 MHz,
- la hauteur effective du dipôle replié est de $\frac{2\lambda}{\pi}$ et elle est égale au double de celle du dipôle simple. Il se crée donc une tension induite V' deux fois plus forte mais la puissance reçue est la même que pour le dipôle simple, soit:

  $$P = \frac{V'^2}{R'} = \frac{(2\,V)^2}{4\,R} = \frac{V^2}{R}$$

  V et R représentent respectivement la tension induite et la résistance de rayonnement du dipôle simple, V' et R' celles du dipôle replié,
- la modification du diamètre du brin parallèle par rapport au diamètre des tiges du dipôle entraîne une modification de la résistance d'antenne,
- du point de vue mécanique, le dipôle replié est plus robuste que le dipôle simple.

Il existe diverses variantes du dipôle replié: nous en présenterons trois: le dipôle à plusieurs brins, le dipôle à segments variables et l'antenne bicône. Souvent, l'on rajoute au dipôle simple **d'autres brins parallèles** qui ont pour effet d'augmenter la résistance de l'antenne(fig. 2.28A). Un calcul similaire donnerait, pour un dipôle replié à trois brins, une résistance 9 fois plus grande, soit 657 Ω. De façon générale, un dipôle replié à n brins aura une résistance R' égale à 73 n^2 ohms.

A)
B)
C)

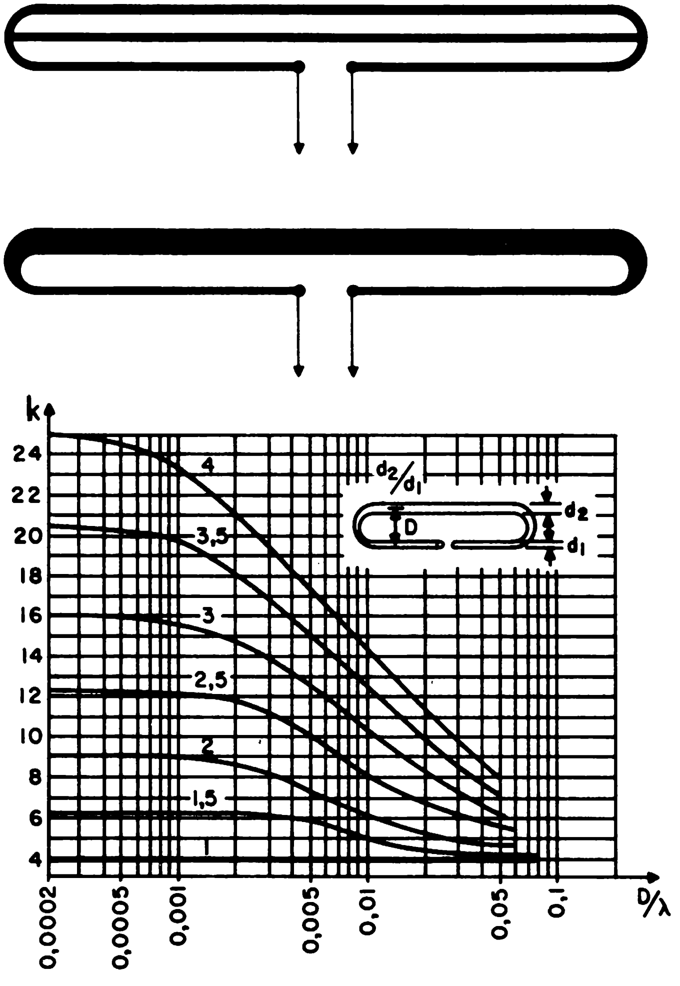


Fig. 2.28. Les variantes du dipôle simple:
A - Dipôle replié à trois brins.
B - Dipôle replié de section non uniforme.
C - Facteur de multiplication de la résistance de rayonnement du dipôle replié par rapport à celle du dipôle simple.

Le dipôle replié de **section non uniforme** (fig. 2.28B) est également utilisé afin de pouvoir adapter l'antenne à une résistance déterminée. La résistance d'antenne varie avec le rapport D/λ, D étant la distance entre les axes du dipôle simple et du brin parallèle. La courbe de la figure 2.28C illustre le facteur de multiplication de la résistance de rayonnement par rapport à celle du dipôle simple, en fonction de D/λ. Le rapport des diamètres des deux brins d_2/d_1 sert de paramètre.

Exemple: un dipôle replié dont le diamètre du dipôle simple d_1 mesure 6 mm et celui du brin parallèle d_2 12 mm, est destiné à être utilisé pour une longueur d'onde de 3 mètres. La distance entre les brins est D = 9 cm. Déterminer la résistance de rayonnement du dipôle replié.

Le paramètre $\frac{d_2}{d_1}$ est égal à $\frac{12}{6} = 2$; en outre, le quotient $\frac{D}{\lambda}$ est égal à $\frac{0,09}{3} = 0,03$. Le facteur de multiplication k est donc 5.

La résistance de rayonnement du dipôle simple de diamètre d_1 est donnée par le tableau 1: pour un rapport $\frac{\lambda}{2d_1}$ égal à $\frac{3}{6.10^{-3}}$ soit 500, nous obtenons une résistance de 62 Ω.

La résistance de rayonnement du dipôle replié est 5 fois plus grande, c'est-à-dire 5 x 62 = 310 Ω.

L'antenne bicône:

Une autre variante du dipôle replié est l'antenne bicône: les brins tendus attachés à des anneaux isolants forment deux cônes (fig. 2.29). Elle est utilisée en polarisation verticale et l'axe des cônes reste vertical.

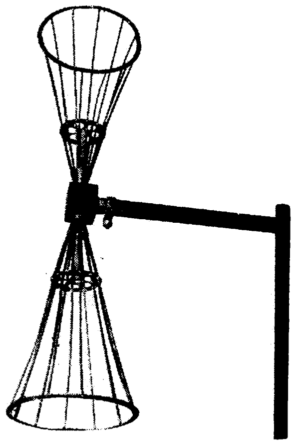


Fig. 2.29. Antenne bicône.

La résistance de rayonnement R est d'autant plus faible que l'angle d'ouverture des cônes est plus grand. Lorsque l'angle d'ouverture du cône est de 20°, on a R = 300 Ω. L'antenne bicône est en résonance lorsque la génératrice de chaque cône a une longueur de 0,365 λ; cette valeur ne dépend pas d'ailleurs de l'angle d'ouverture des cônes. La caractéristique de rayonnement de l'antenne bicône est encore comparable à celle du dipôle simple; elle constitue une excellente antenne d'émission sur une bande passante assez large, surtout lorsque la puissance fournie est faible.

2. GROUPEMENTS D'ANTENNES

Nous présenterons ici trois modes de groupement d'antennes: l'antenne colinéaire, le groupement d'antennes parallèles (Broadside array) et le groupement d'antennes alimenté en quadrature (End fire array).

a) L'antenne colinéaire:

L'antenne colinéaire consiste en deux antennes demi-longueur d'onde ou plus, placées bout à bout et alimentées en phase. Nous obtenons un diagramme de rayonnement comparable à celui de l'antenne dipôle, encore que celui-ci soit plus directif. La directivité augmente avec le nombre de dipôles demi-longueurs d'onde associés bout à bout(fig. 2.30).Notons que le diagramme de rayonnement demeure toujours bidirectionnel.

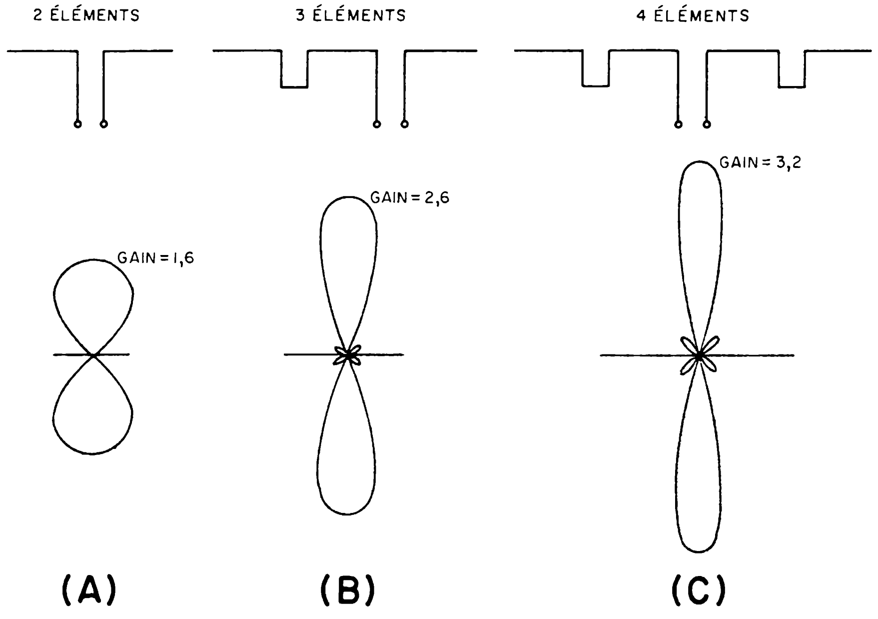


Fig. 2.30. Diagrammes de radiation et gains de directivité d'antennes colinéaires.

Entre différentes dipôles demi-longueur d'onde nous avons des lignes parallèles de longueur λ/4 qui n'ont aucun effet sur le rayonnement de l'antenne. L'espace d existant entre deux antennes colinéaires influe sur la résistance de rayonnement et sur le gain, car les antennes se trouvent chacune baignées dans le rayonnement de l'autre et la réaction mutuelle est plus importante. Lorsque deux antennes sont alimentées en phase, la réaction maximun a lieu pour un écartement de 0,65 λ environ.

b) Le groupement d'antennes parallèles.

Le groupement d'antennes parallèles espacées d'une ou deux demi-longueurs d'onde permet d'obtenir des gains de directivité appréciables.

Le rapprochement de deux antennes émettrices l'une de l'autre provoque une influence mutuelle: la première se trouvant dans le champ de la deuxième va être le siège d'un courant induit qui se superposera au courant primitif pour donner un courant résultant dont la valeur dépendra de la phase respective des deux courants. La première antenne réagira de la même façon sur la seconde: le gain de directivité et la résistance de rayonnement dépendront donc de l'écart qui sépare les deux antennes. La figure 2.32 illustre cette interdépendance. Remarquons que lorsque plusieurs éléments sont placés de manière à réagir les uns sur les autres, la combinaison qui donne le maximum de gain est aussi celle qui correspond à la résistance de rayonnement minimum (figure 2.31).

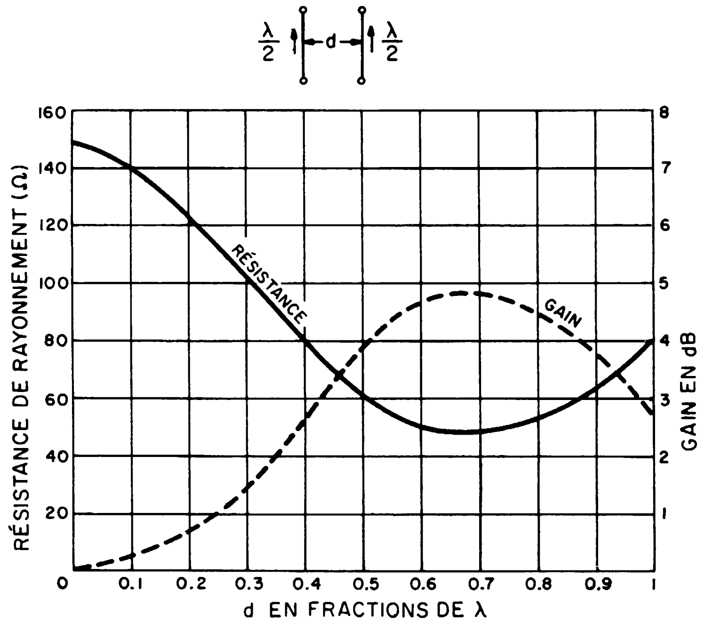


Fig. 2.31. Résistance de rayonnement et gain de directivité en fonction de la distance d pour deux demi-ondes alimentées en phase.

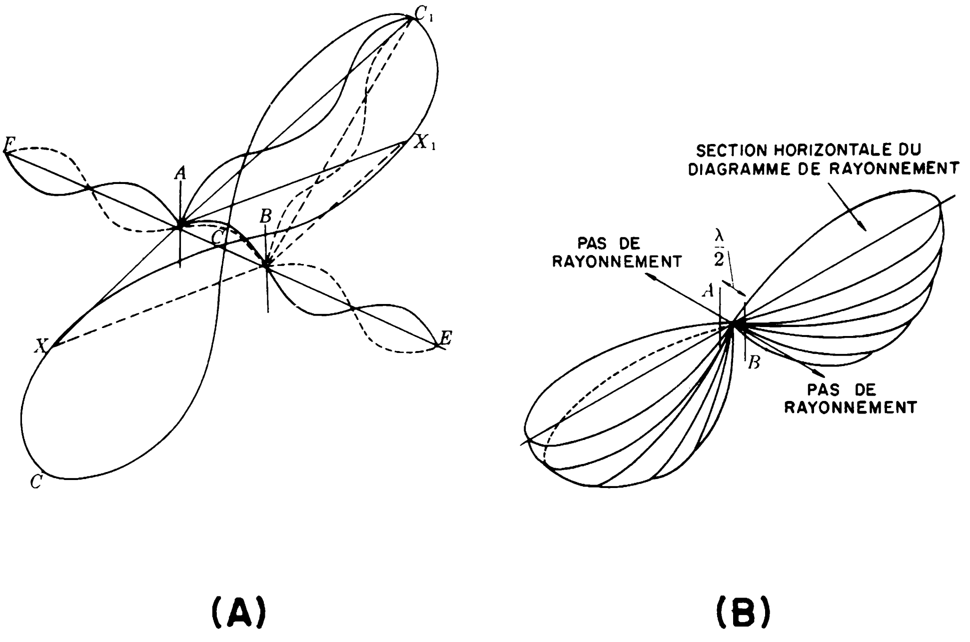


Fig. 2.32. A - Rayonnements respectifs de deux antennes espacées de λ/2.
B - Diagramme de rayonnement de deux antennes parallèles alimentées en phase.
Document "Radio Fondamentals".

Le diagramme de rayonnement de deux antennes parallèles alimentées en phase est donné dans la figure 2.32B. Dans le plan formé par les antennes, le rayonnement est nul étant donné que les ondes émises sont en opposition de phase et qu'elles s'annulent donc (direction EF de la figure 2.32A). Il en est tout autrement dans le plan perpendiculaire aux antennes, ces ondes venant s'ajouter en C_1 en raison de l'équidistance de C_1 par rapport à A et B. Il en résulte une valeur intermédiaire autre, comme tel est le cas pour les points X de la figure 2.32A.

Les groupements d'antennes parallèles peuvent être disposés de différentes façons: horizontalement, verticalement, ou combinaison des deux. Le tableau 4 illustre les gains obtenus par le groupe de 2 antennes colinéaires parallèles en fonction de l'écart qui sépare les antennes (figure 2.33).

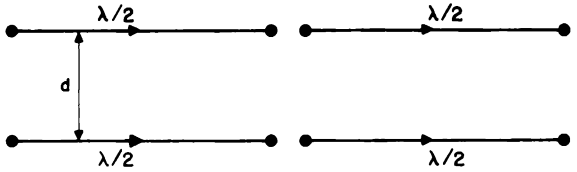


Fig. 2.33. Exemple de groupement d'antennes coliéaires parallèles.

TABLEAU 4 Gain de quatre demi-ondes disposées suivant la figure 33 et alimentées en phase, en fonction de la distance d.				
d	0,375 λ	0,5 λ	0,625 λ	0,75 λ
Gain	4,4	5,9	6,7	6,6

La figure 2.34 présente le diagramme de rayonnement et les gains de directivité obtenus pour les groupements de 2, 4 et 6 éléments.

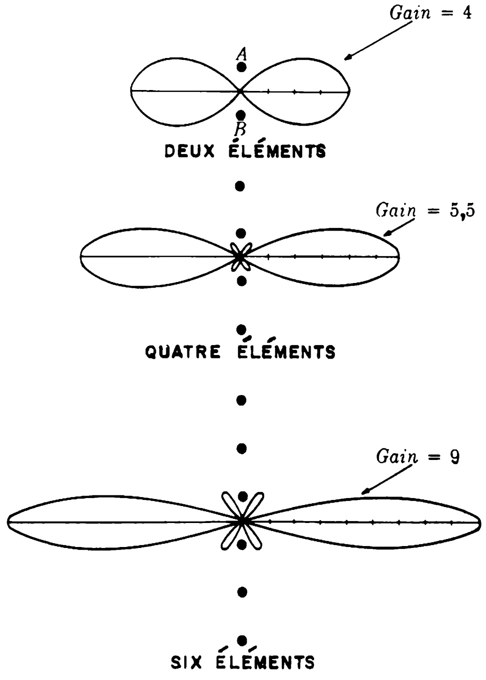


Fig. 2.34. Gain de directivité et radiations obtenues par 2, 4 et 6 antennes parallèles.
Document "Radio Fondamentals".

Parfois, nous sommes intéressés par une radiation unidirectionnelle: nous plaçons un écran réflecteur à une distance λ/4 des antennes parallèles: l'écran ne laisse passer aucune onde et réfléchit celles qui l'atteignent, renforçant ainsi la directivité de l'ensemble.

c) Groupement d'antennes alimentées en quadrature:

Deux antennes demi-longueur d'onde et espacées de λ/4 sont montées verticalement, alimentées par des courants égaux mais dont la phase diffère de 90°. Ces antennes permettent d'obtenir un diagramme de rayonnement unidirectionnel: la figure 2.35 en illustre le mécanisme.

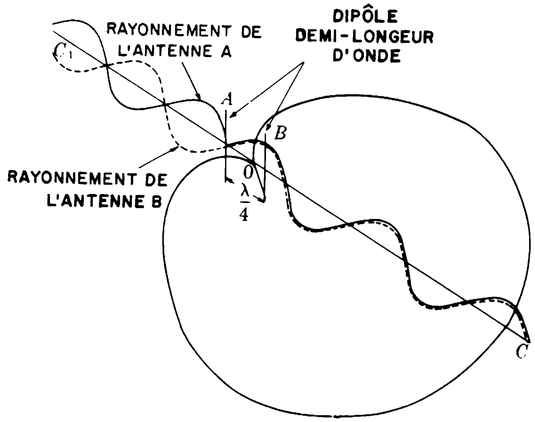


Fig. 2.35. Principe d'alimentation d'antennes en quadrature.
Document "Radio Fondamentals".

L'émission à partir de l'antenne A renforce celle de l'antenne B dans le sens de l'antenne B, à cause de la différence de phase λ/2 prévalant entre les alimentations respectives. Ces émissions s'annulent par contre dans le sens de l'antenne A, ce qui nous donne le diagramme de rayonnement représenté en figure 2.36.

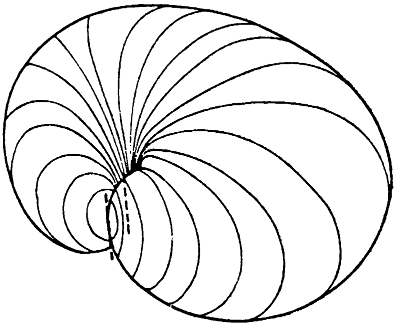


Fig. 2.36. Enveloppe du diagramme de rayonnement d'antennes alimentées en quadrature.
Document "Radio Fondamentals"

Le groupement d'antennes alimentées en quadrature offre une résistance de rayonnement assez basse et, par conséquent, plus difficile à alimenter. Il permet d'obtenir par contre une directivité optimale.

3. ANTENNES AVEC ELEMENTS PASSIFS, ANTENNES YAGI

Si un conducteur se trouve à proximité d'une antenne rayonnante, un fort courant y est induit. Ce courant rayonne à son tour et son rayonnement s'ajoute à celui de l'antenne. Le diagramme de rayonnement en résultant dépendra de la position respective du conducteur et de l'antenne. Cette position détermine l'amplitude et la phase du courant induit, ainsi que le rayonnement total.

Ce phénomène est utilisé intentionnellement, et le conducteur utilisé est dit **élément passif** ou parasite: l'élément passif permet d'obtenir une antenne directionnelle, de largeur de faisceau contrôlable. Une telle antenne, rendue sensible à l'émission provenant d'une seule direction, évite donc les interférences avec d'autres émissions sur fréquences semblables.

L'élément passif se trouvant du côté opposé du lobe de rayonnement principal est dit **réflecteur.** L'élément passif se trouvant du côté du lobe de rayonnement principal est dit **directeur** (figure 2.37).

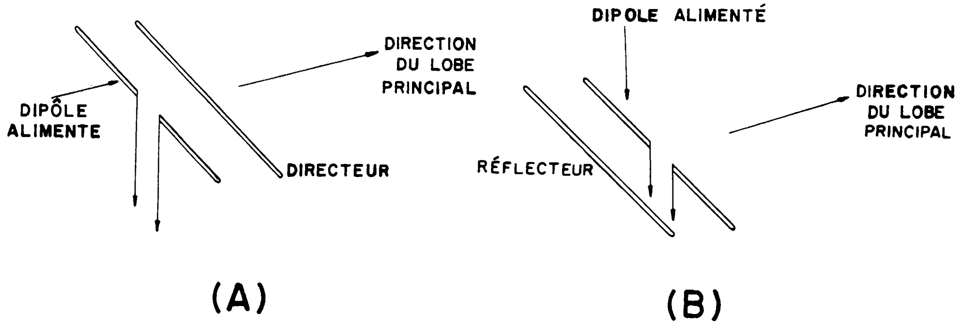


Fig. 2.37. A - Dipôle avec directeur.
B - Dipôle avec réflecteur.
Document "Radio Fondamentals".

a) L'élément réflecteur:

Considérons l'élément parasite B de longueur $\lambda/2$ placé parallèlement à un dipôle alimenté électriquement A (fig. 2.38) à une distance $\lambda/4$. En raison de la distance $\lambda/4$ séparant les deux éléments, l'onde arrivant en B survient avec un retard de phase de 90° par rapport à celle qui émerge en A. Un courant induit se crée donc en B, et selon la loi de Lenz, tend à s'opposer à l'effet produit. Un courant déphasé de 180° par rapport à l'onde en B prend naissance, représentant ainsi un retard de phase de 270° par rapport à A (ou avance de phase de 90° par rapport à A). L'énergie émise à partir de B arrive en A après un intervalle de $\lambda/4$ et est donc en phase avec l'énergie ondulatoire émise à partir de A dans la direction C. Cependant, les ondes émises à partir de A et B s'annulent dans la direction C_1, indiquant une directivité de l'ensemble telle que l'élément B semble réfléchir les ondes qui lui sont incidentes.

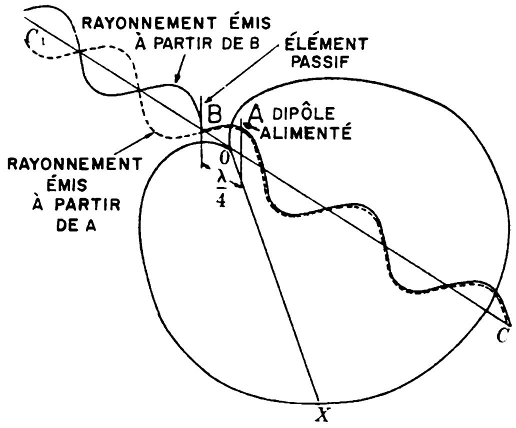


Fig. 2.38. La fonction d'un réflecteur.
Document "Radio Fondamentals".

En pratique, il n'est pas nécessaire de placer un réflecteur à une distance λ/4 du dipôle alimenté: si l'élément parasite est légèrement plus long, il devient inductif. Ceci produit un déphasage d'onde émise, pouvant compenser l'éloignement λ/4 entre le dipôle alimenté et le réflecteur; on prend en général un réflecteur 5% plus long que le dipôle alimenté. En fait la réflexion optimale est obtenue pour un écart équivalent à 0,15 λ entre le dipôle alimenté et le réflecteur: ce résultat reste valable pour les rapports longueurs d'onde-diamètre d'antenne variant entre 300 et 400.

b) L'élément directeur:

Un élément passif de longueur sensiblement inférieure à celle (λ/2) du dipôle alimenté, est capacitif: il provoque une avance de phase. Les ondes qui s'annulaient dans le cas d'un réflecteur s'additionnent dans ce cas-ci. Celles qui étaient en phase se trouvent actuellement en antiphase. L'énergie émise est donc maximale dans la direction de l'élément passif, ici le directeur. Des résultats optimaux sont obtenus pour des directeurs dont la longueur est de 4% plus courte que celle du dipôle demi-longueur d'onde alimenté, distants de 0,2 λ de celui-ci, et ce, pour des rapports longueur d'onde-diamètre variant entre 300 et 400.

c) Longueurs effectives des réflecteurs et directeurs:

Nous nous souvenons que la longueur effective ℓ_e d'un dipôle demi-longueur d'onde est donnée pour des fréquences n'atteignant pas 30 MHz par la relation:

$$\ell_e = \frac{c}{2f} \times 0,94$$

$$= \frac{141}{f} \text{ mètres, f étant donné en MHz}$$

La longueur effective d'un réflecteur sera donc:

$$\ell_e = \left(\frac{c}{2f}\right) \times 0{,}94 \times 1{,}05$$

$$= \frac{148{,}05}{f} \text{ mètres, f étant donné en MHz}$$

La longueur effective du directeur sera:

$$\ell_e = \left(\frac{c}{2f}\right) \times 0{,}94 \times 0{,}96$$

$$= \frac{133{,}95}{f} \text{ mètres, f étant donné en MHz}$$

Au dessus de 30 MHz, il faudra prendre en considération le facteur de raccourcissement k donné par la figure 2.26.

En pratique, les longueurs des réflecteurs et des directeurs seront choisies en fonction de leur diamètre et de l'écart les séparant de l'élément alimenté; les formules précédentes sont donc très approximatives.

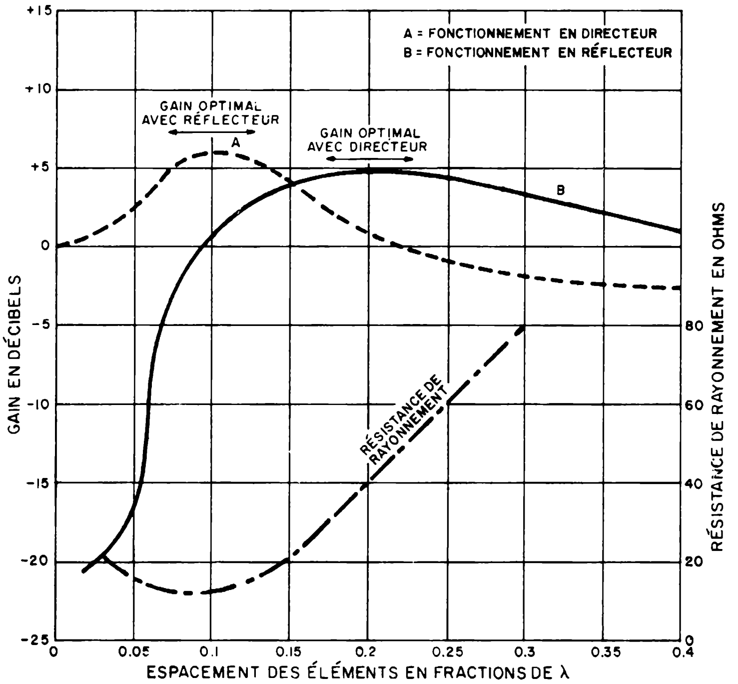
La figure 2.39A montre la variation de gain avec celle de la distance dipôle-élément passif et l'influence de cette dernière sur la résistance de rayonnement. L'élément passif est supposé avoir la même longueur que le dipôle alimenté.

En créant des espacements allant de 0,5 à 0,15 λ, l'élément parasite se conduit en directeur et lorsque les espacements vont de 0,15 λ à 0,25 λ, l'élément parasite se conduit en réflecteur, c'est-à-dire qu'il émet un maximum d'énergie dans le sens parasite-dipôle.

La figure 2.39B présente les gains obtenus grâce à un élément parasite dont la longueur a été accordée de façon à obtenir gain de directivité maximal (les longueurs obtenues sont proches de l'approximation présentée précédemment).

Souvent, on utilise plus d'un élément directeur afin d'obtenir une largeur de faisceau moindre. L'effet de plusieurs éléments consiste à diminuer la bande passante, la résistance de rayonnement et à augmenter le gain de directivité: c'est le principe de l'antenne Yagi.

A)



B)

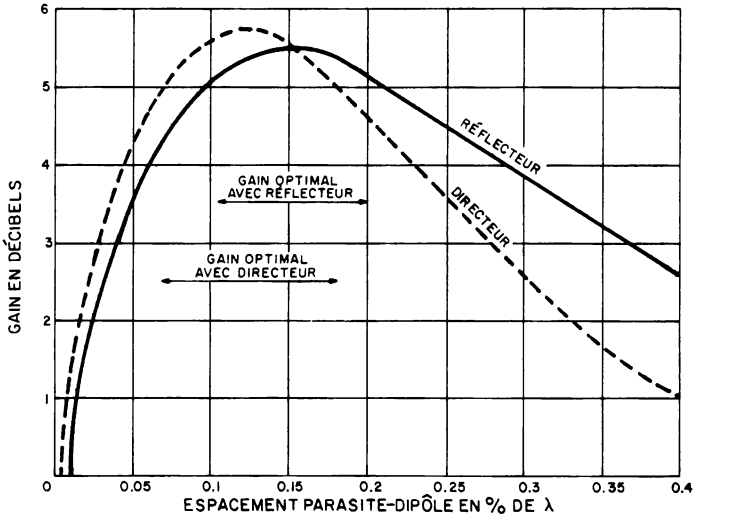


Fig. 2.39. A - Fonctionnement de l'antenne à élément parasite. Le dipôle et le parasite ont la même longueur.

B - Gain de l'antenne à élément parasite. La longueur du parasite est ajustée à chaque changement de distance au dipôle pour obtenir le gain maximum.

d) L'antenne Yagi:

L'antenne Yagi utilise plusieurs éléments parasites avec un seul dipôle alimenté électriquement en vue d'obtenir un très grand gain de directivité. La hauteur effective d'une telle antenne est donnée par la relation:

$$h_e = \frac{\lambda}{\pi} \cdot G \tag{2-11}$$

où G représente le gain de puissance de l'antenne.

La figure 2.40A donne quelques exemples d'antenne Yagi, ainsi que leur gain de directivité théorique. La figure 2.40B présente un diagramme de rayonnement typique.

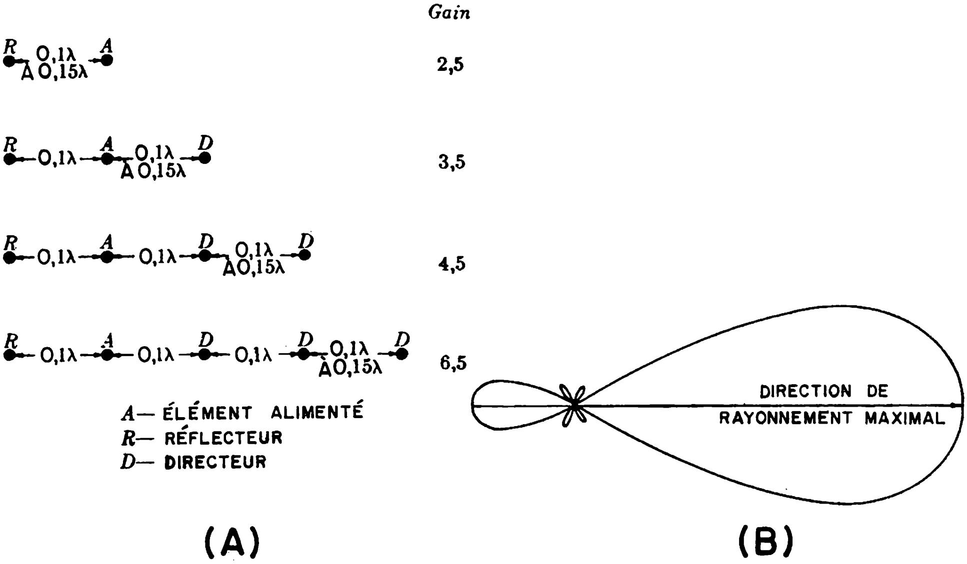


Fig. 2.40. A - Gain théorique d'antennes utilisant directeurs et réflecteurs (antennes Yagi).
B - Diagramme de rayonnement type de l'antenne Yagi.

Une antenne Yagi classique est l'antenne faite de trois directeurs, un réflecteur et un dipôle replié (figure 2.41).

Le tableau 5 donne les dimensions d'antenne optimales à trois directeurs, un réflecteur et un dipôle simple, les éléments étant espacés de 0,2 λ. Si, par exemple, nous devions travailler sur la fréquence de 146 MHz, nous devrions raccourcir toutes les longueurs de 2 x (0,63) = 1,26 cm (voir la correction à la ligne 3 du tableau 5).

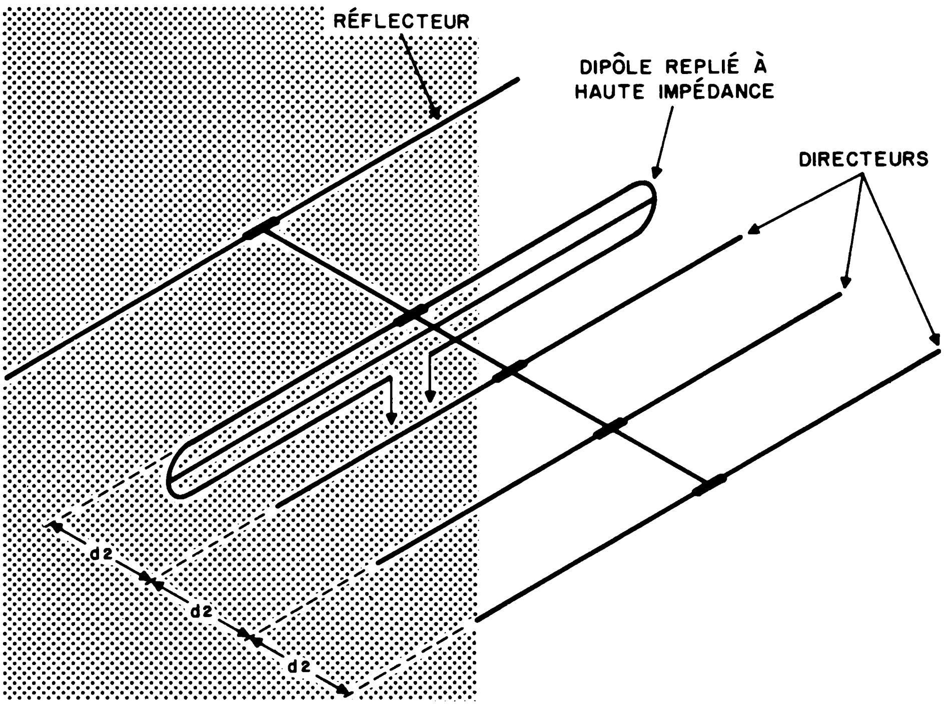


Fig. 2.41. Antenne Yagi à 5 éléments: 4 éléments passifs + 1 élément actif.

TABLEAU 5				
DIMENSIONS OPTIMALES D'ANTENNE YAGI A UN RÉFLECTEUR ET TROIS DIRECTEURS POUR FRÉQUENCES VHF (Fréquences en MHz, longueurs en cm)				
Fréquence	50	144	220	432
Elément alimenté	281,9	98,0	64,6	33,0
Changement par MHz	5,0	0,63	0,31	0,08
Réflecteur	295,9	102,8	67,9	34,29
1er Directeur	267,9	93,0	61,2	31,2
2e Directeur	262,9	92,6	60,9	31,1
3e Directeur	257,8	91,7	60,6	31,0
1/2 longueur d'onde	300,0	104,1	68,1	34,7
0,2 longueur d'onde	120,0	41,6	27,3	13,8

Un autre type assez fréquent d'antenne Yagi est celui qui est constitué par 10 directeurs, 3 réflecteurs et un dipôle replié, tel que représentés dans la figure 2.39A: le diagramme de rayonnement approprié est présenté dans la figure 2.42B.

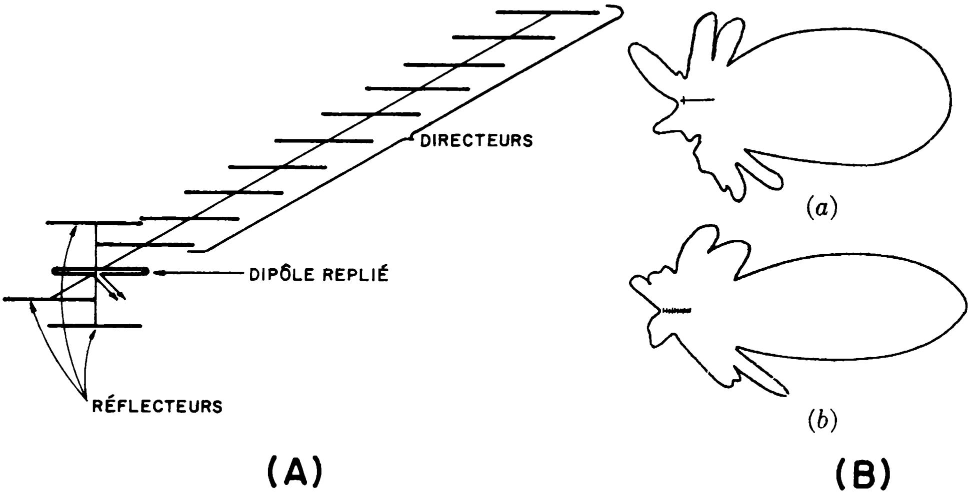


Fig. 2.42. A - Antenne Yagi utilisant 3 réflecteurs et 10 directeurs.
B - Diagrammes de rayonnement
(a) dans le plan vertical, (b) dans le plan horizontal pour l'antenne Yagi à 3 réflecteurs et 10 directeurs.

Nous utilisons parfois plusieurs antennes Yagi parallèles l'une à l'autre (figures 2.43, 2.44) ou même côtes à côtes comme tel est le cas pour les antennes H (figure 2.45) où chaque H est constitué d'un dipôle alimenté et d'un réflecteur.

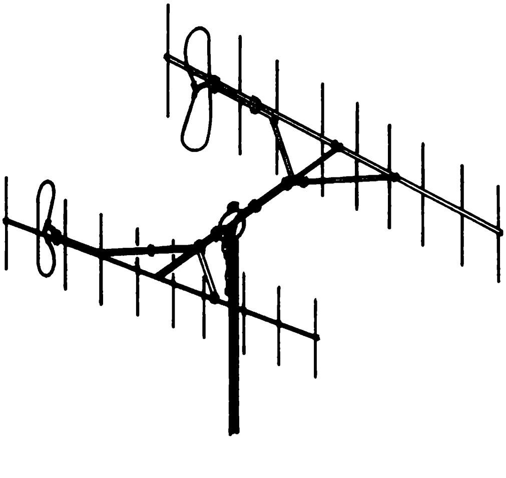


Fig. 2.43. Antenne Yagi à polarisation verticale.

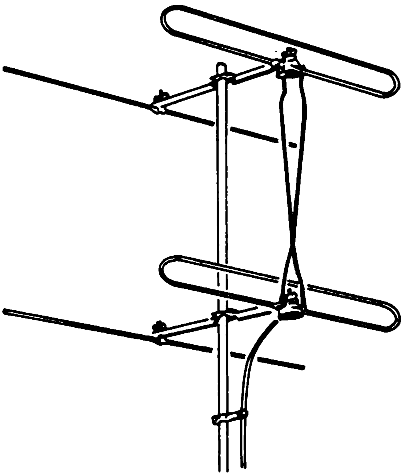


Fig. 2.44. Antenne Yagi à 2 étages.

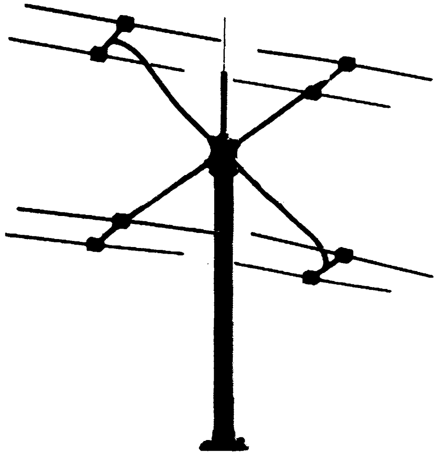
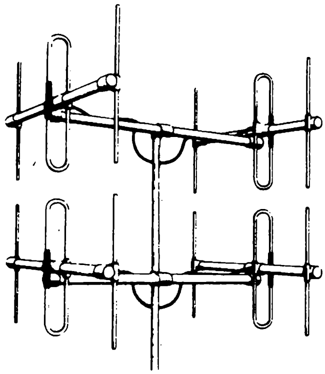


Fig. 2.45. Antenne à 4 H complémentaires.
Document "Radio Fondamentals".

Plusieurs combinaisons sont donc possibles, selon le nombre de directeurs utilisés ou le nombre d'étages et il ne serait pas possible de les décrire toutes: quelques exemples sont illustrés en figure 2.46.



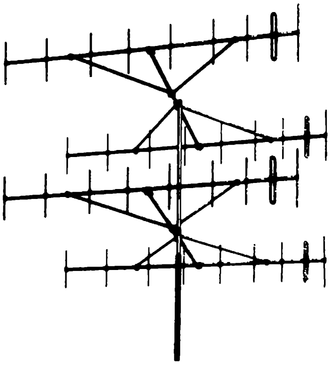


Fig. 2.46. Antenne Yagi: montages étagés.

Notons l'utilisation de plans réflecteurs (fig. 2.47A) ou de plans réflecteurs à angle droit (fig. 2.47B) ou de plans réflecteurs paraboliques (fig. 2.47C), tous constitués de plusieurs réflecteurs et d'un seul élément alimenté. La première réalisation permet un gain de 7 dB, la seconde un gain de 12 dB et la troisième un gain de plus de 30 dB, ainsi qu'une largeur de faisceau de 2 à 3° seulement.

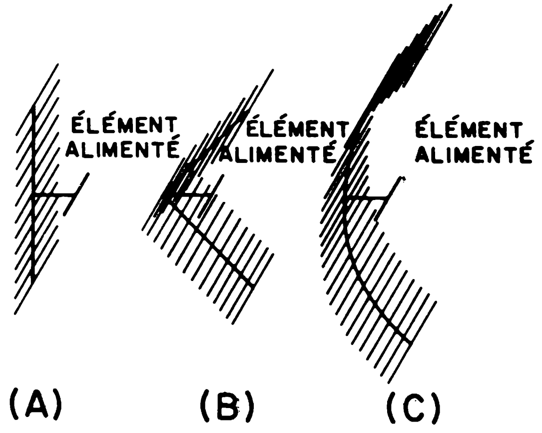


Fig. 2.47. Antennes à faisceaux: (a) avec plan réflecteur, (b) à plans réflecteurs perpendiculaires, (c) à réflecteur parabolique.

Les effets des éléments passifs pourraient être comparés à des effets optiques analogues: le dipôle alimenté représente la source de lumière, le réflecteur sert de miroir et le directeur de lentille convergente. Dans le cas d'antenne réceptrice, le directeur sert de lentille convergente, le réflecteur de miroir et le dipôle de foyer de la lentille où convergent les rayonnements (fig. 2.48).

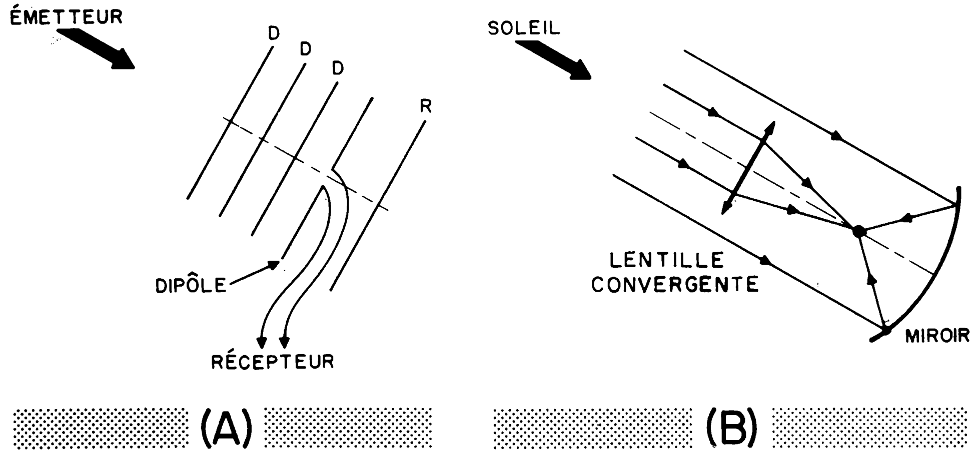


Fig. 2.48. Analogie optique du système Yagi.

4. ANTENNE RHOMBIQUE

L'antenne rhombique — ou antenne en losange — est un développement de l'antenne non résonnante: elle consiste en deux longs conducteurs non résonnants disposés horizontalement en forme de V et connectés à une résistance R. Cette antenne est idéale pour les transmissions en HF et possède un très fort gain de directivité (de 20 à 90), le gain augmentant avec la longueur des conducteurs utilisés.

La longueur des conducteurs de chaque côté du losange varie de 2 à 8 λ et l'angle ϕ varie de 40 à 75° selon la hauteur de l'ensemble (fig. 2.49). De fait, cet angle est ajusté de façon à ce que les diagrammes de rayonnement s'ajoutent. L'impédance d'entrée d'un tel système varie de 650 à 700 Ω; la résistance R est souvent choisie égale à 800 Ω. Cette résistance dissipe près d'un tiers de l'énergie électrique et le gain de puissance varie entre 15 et 60.

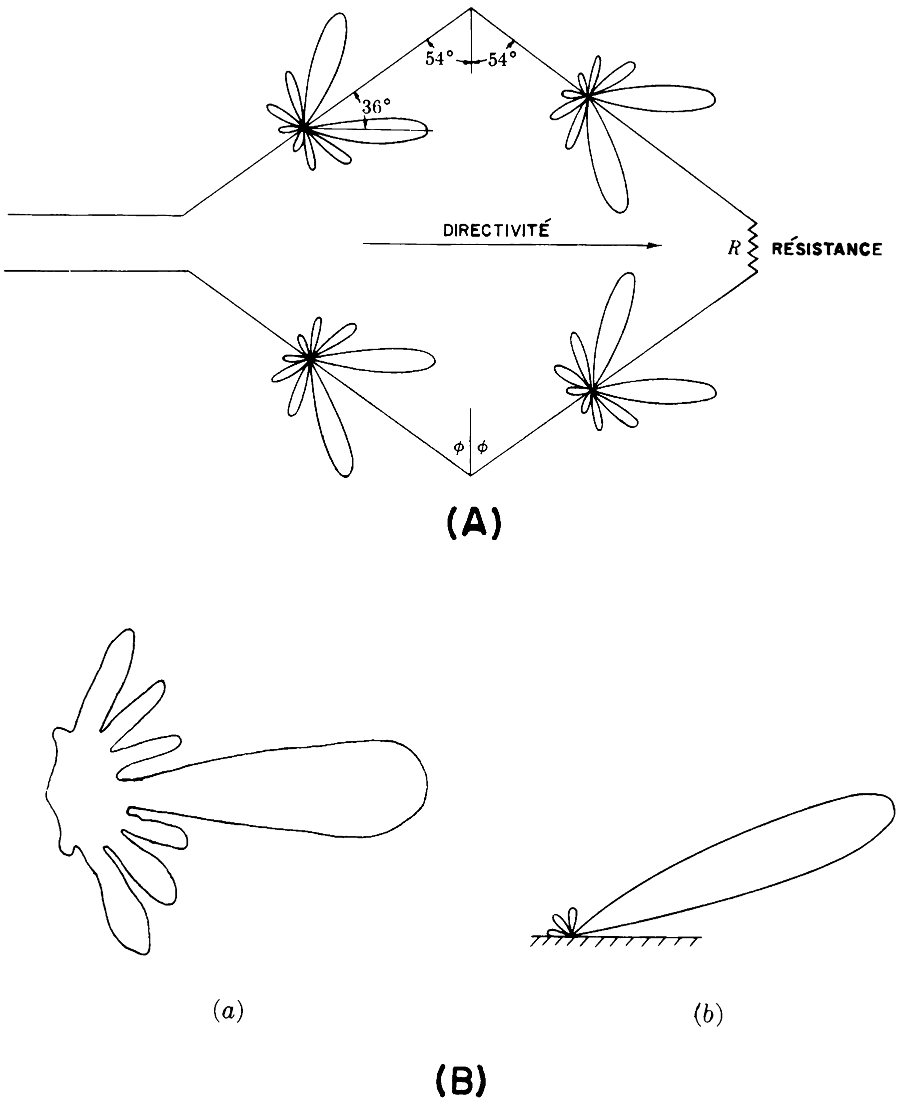
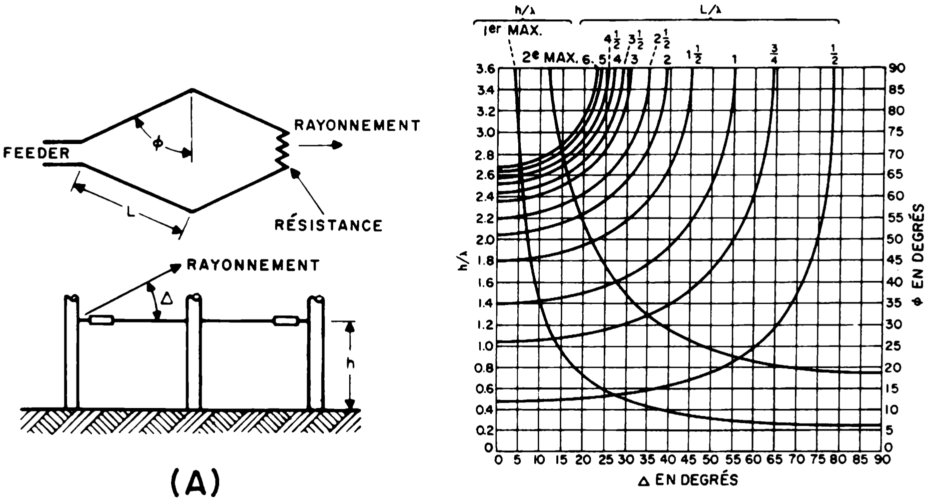


Fig. 2.49. A - L'antenne rhombique et les diagrammes de rayonnement partiels.
B - Diagramme de radiation (a) horizontal, (b) vertical d'une antenne rhombique.

Document "Radio Fondamentals".

Un moyen sûr de construire une antenne rhombique en haute fréquence est de choisir une longueur de fils en général inférieure à 6 λ et l'angle d'élévation du faisceau Δ; l'angle ϕ et la hauteur h des mats d'antenne se déduisent alors de la figure 2.50B.



(A) (B)

Fig. 2.50. A - Paramètres d'une antenne rhombique.
B - Détermination des dimensions d'une antenne rhombique.
Document "Howard W. Sams & Co., Inc."

Exemple: Prenons $\Delta = 20^\circ$ et $L = 4\,\lambda$. Trouvons la hauteur h et l'angle ϕ en nous basant sur la figure 2.50B. Une droite verticale menée à partir de $\Delta = 20^\circ$ rencontre la courbe $\frac{L}{\lambda} = 4$ en un point auquel correspond la valeur d'angle ϕ de 71,5°. L'intersection avec les courbes $\frac{h}{\lambda}$ détermine deux valeurs possibles qui sont: $\frac{h}{\lambda} = 0{,}74$ et $\frac{h}{\lambda} = 2{,}2$; ces deux valeurs sont utilisables.

Etant donné que l'antenne n'est pas résonnante, elle présente une bande passante assez large contenant des fréquences dont le rapport peut varier de 1 à 4 (7,5 MHz à 30 MHz, par exemple). A cause de sa dimension, elle est assez encombrante. Elle est utilisée en haute fréquence HF, quoique concurrencée par l'antenne log-périodique.

5. ANTENNES EN HYPERFREQUENCES

Pour la gamme de fréquences variant de 1 à 100 GHz, les antennes d'émission et de réception sont très directives: en raison de leur gain prononcé d'une part, et d'autre part de l'intérêt des émissions directives dans les techniques radars. Ces antennes pouvent être classées en trois groupes: les antennes à écran réflecteur parabolique, les antennes à cornet et les antennes à lentille.

a) L'antenne à écran réflecteur paraboloïde:

Un dipôle situé au foyer d'un écran à profil parabolique, dirigera vers lui les ondes incidentes à cet écran et, en cas d'émission, émettra en direction de l'écran des rayonnements qui seront réfléchis dans une même direction (fig. 2.48). C'est le principe de l'antenne à écran réflecteur paraboloïde: l'écran permet une largeur de faisceau faible et un gain de puissance considérable.

La largeur de faisceau ϕ d'une telle antenne est déterminée par la longueur d'onde utilisée λ et le diamètre d'ouverture D de l'antenne selon la relation:

$$\phi = \frac{70\,\lambda}{D} \qquad (2\text{-}12)$$

Et le gain de puissance maximal G par rapport à un dipôle demi-longueur est:

$$G = 6\left(\frac{D}{\lambda}\right)^2 \qquad (2\text{-}13)$$

Exemple: une antenne de diamètre d'ouverture 183 cm et destinée à émettre 6 GHz aura une largeur de faisceau:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.10^8}{6.10^9} = 0{,}05 \text{ m} = 5 \text{ cm}$$

D'où l'angle d'ouverture:

$$\phi = \frac{70 \times 5}{183} = 1{,}41^\circ$$

Le gain de puissance maximum sera:

$$G = 6\left(\frac{D}{\lambda}\right)^2 = 6\left(\frac{183}{5}\right)^2 = 8050$$

c'est-à-dire qu'une antenne émettant 1 watt aurait une puissance de rayonnement effective de 8 050 watts dans la section de son lobe principal.

Afin d'être efficace, une antenne à écran paraboloïde doit avoir un diamètre d'ouverture d'au moins 10 λ.

Exemple: Une antenne à écran réflecteur paraboloïde émet sur une fréquence de 10 GHz une puissance de 100 kW; son diamètre est de 2 m. Une seconde antenne à écran réflecteur paraboloïde d'un diamètre égal à la moitié de la précédente se trouve à une distance de 300 km, faisant face à celui de l'antenne émettrice. Quelle est la puissance captée par cette antenne ?

Remarquons qu'à ces fréquences les coefficients d'efficacité sont proches de 1; ce qui fait que la puissance électrique fournie P_e est entièrement rayonnée; de même, la puissance de rayonnement reçue P_r est transformée intégralement en puissance électrique.

Si G_t est le gain de l'antenne de transmission, la densité de puissance de rayonnement p_r à une distance d sera:

$$p_r = \frac{P_e \times G_t}{4 \pi d^2}$$

Et la puissance captée sera, si A est la surface de l'antenne de réceptio

$$P_r = p_r \times A$$

Numériquement, nous aurons:

Longueur d'onde émise:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.10^8}{10.10^9} = 0{,}03 \text{ m} = 3 \text{ cm}$$

Puissance rayonnée:

$$P_t = 100 \text{ kW}$$

Gain de puissance:

$$G_t = 6 \left(\frac{D}{\lambda}\right)^2 = 6 \left(\frac{2}{3.10^{-2}}\right)^2 = 26\ 666$$

Densité de puissance rayonnée:

$$p_r = \frac{P_e \cdot G_t}{4\pi d^2} = \frac{10^5 \times 26\,666}{4\pi \times (3 \times 10^5)^2} = 2{,}35 \text{ mW/m}^2$$

En prenant en considération l'atténuation due à l'absorption atmosphérique (fig. 1.12) l'oxygène de l'air atténue de 0,015 dB/km et la vapeur d'eau atténue de 0,003 dB/km à cette fréquence, soit une atténuation totale de 0,018 dB/km donnant lieu à une atténuation de 0,018 × 300 = 5,5 dB à une distance de 300 km.

D'où la puissance effective:

$$-5 = 10 \log \frac{p'_r}{p_r} = 10 \log \frac{p'_r}{2{,}35.10^{-3}}$$

$$p'_r = 2{,}35 \times 0{,}28 \text{ mW/m}^2$$

$$= 0{,}658 \text{ mW/m}^2$$

$$= 658$$

Et la puissance reçue:

$$P_r = p'_r \times A = 658 \ .10^{-6} \times \frac{\pi\,(1)^2}{4}$$

$$= 0{,}52 \text{ mW}$$

L'alimentation d'une telle antenne peut se faire par un dipôle disposé au foyer (fig. 2.51) ou par un guide d'ondes dont l'ouverture serait au foyer (fig. 2.52) ou par un guide d'onde émettant sur un réflecteur secondaire hyperboloïde comme c'est le cas dans l'alimentation Cassegrain (fig. 2.53).

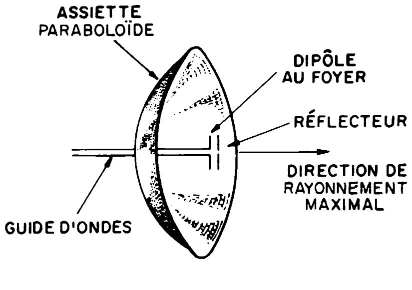


Fig. 2.51. Antenne à écran réflecteur paraboloïde.
Document "Radio Fondamentals"

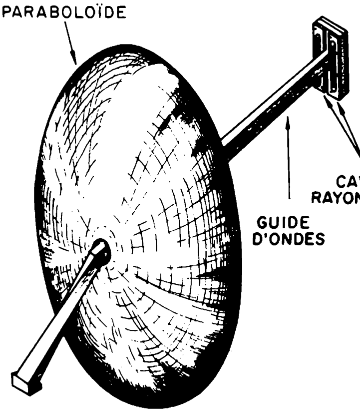


Fig. 2.52. Antenne à réflecteur paraboloïde alimentée par un guide d'ondes.
(Vue arrière) Document "Radio Fondamentals".

L'inconvénient d'une telle antenne réside dans l'existence de lobes secondaires latéraux qui induisent de faux échos en radar (les échos électromagnétiques sont supposés être recueillis dans le lobe principal de l'antenne); l'existence de ces lobes provient de ce que le réflecteur n'est pas parfait ainsi que la discontinuité aux bords de l'assiette paraboloïde. En réalité, le gain de puissance G d'une telle antenne devrait être:

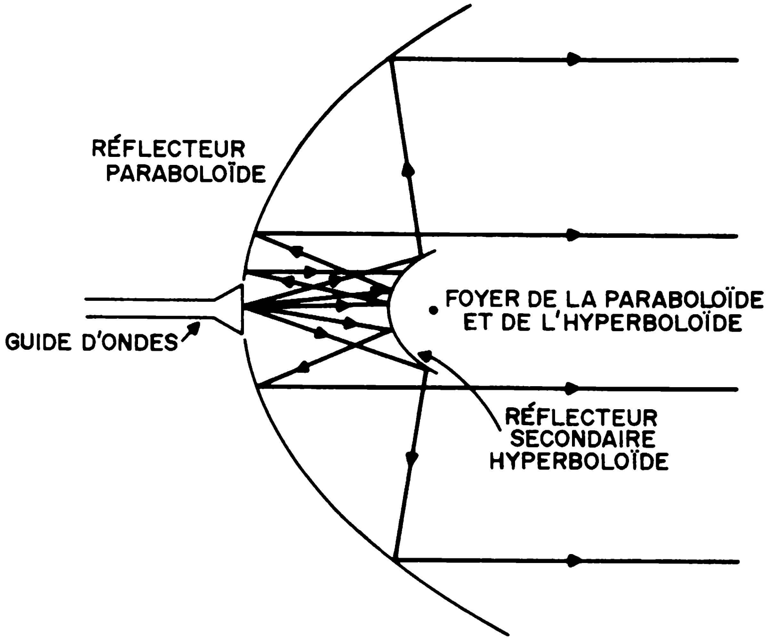
$$G = \frac{4\pi \cdot A}{\lambda^2}$$

A étant la surface d'ouverture soit $\frac{\pi D^2}{4}$; en pratique, il faut multiplier la surface A par un coefficient d'efficacité d'antenne k (égal à 0,64 dans le cas du réflecteur paraboloïde), afin d'obtenir la surface effective (parallèlement à la "longueur effective" d'une antenne unifilaire).

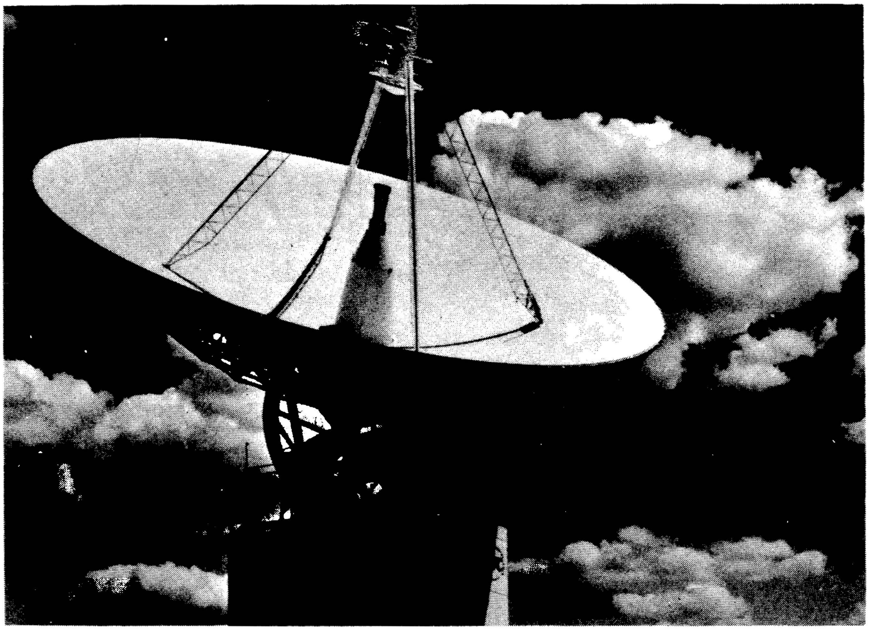
D'où:

$$G = \frac{4\pi\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)}{\lambda^2} \times 0{,}64$$

$$= 0{,}65\ \pi^2 \left(\frac{D}{\lambda}\right)^2 = 6{,}4 \left(\frac{D}{\lambda}\right)^2 \approx 6 \left(\frac{D}{\lambda}\right)^2$$



(A)



(B)

Fig. 2.53. A - Géométrie de l'antenne à alimentation de type Cassegrain.
B - Antenne à réflecteur paraboloïde à alimentation de type Cassegrain. Cette antenne a un diamètre de 25,9 mètres.

(Document Mc Graw-Hill)

b) L'antenne à cornet:

L'antenne à cornet est une prolongation évasée du guide d'ondes (fig. 2.54) et l'ordre de grandeur de ses dimensions est généralement comparable à la longueur d'onde utilisée. Nous pouvons obtenir pour un angle d'ouverture ϕ de 40° et du rapport L/λ égal à 6 une largeur de faisceau de 66° et un gain de directivité égal à 40. Pour un angle d'ouverture ϕ de 15° et un rapport L/λ égal à 50, nous avons une largeur de faisceau de 23° et un gain de directivité égal à 120.

D'une façon approximative, le gain de directivité maximal D pour les antennes dont la longueur de cornet L est supérieure ou égale au rapport $\frac{A^2}{\lambda}$, A étant la surface d'ouvertude du cornet, est donné par la relation:

$$D = 10\frac{A}{\lambda^2} \tag{2-14}$$

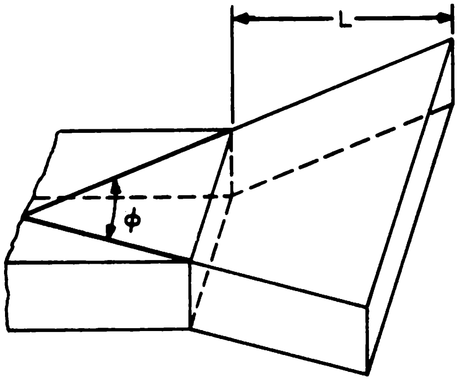


Fig. 2.54. Antenne à cornet.

La forme du cornet, ainsi que les dimensions de son ouverture, déterminent le diagramme de rayonnement; la figure 2.55 illustre cet état de fait; notons que plus l'ouverture du cornet est large et plus celui-ci est directif dans le plan horizontal. Inversement, plus la hauteur d'ouverture du cornet est grande et plus celui-ci est directif dans le plan vertical.

Certaines antennes à cornet utilisent une surface réfléchissante paraboloïde afin de concentrer les rayonnements en un même point qui est le foyer de la parabole; d'autres antennes à cornet utilisent une double surface paraboloïde afin de concentrer les rayonnements par réflexions successives au même point. La figure 2.56 schématise ces processus.

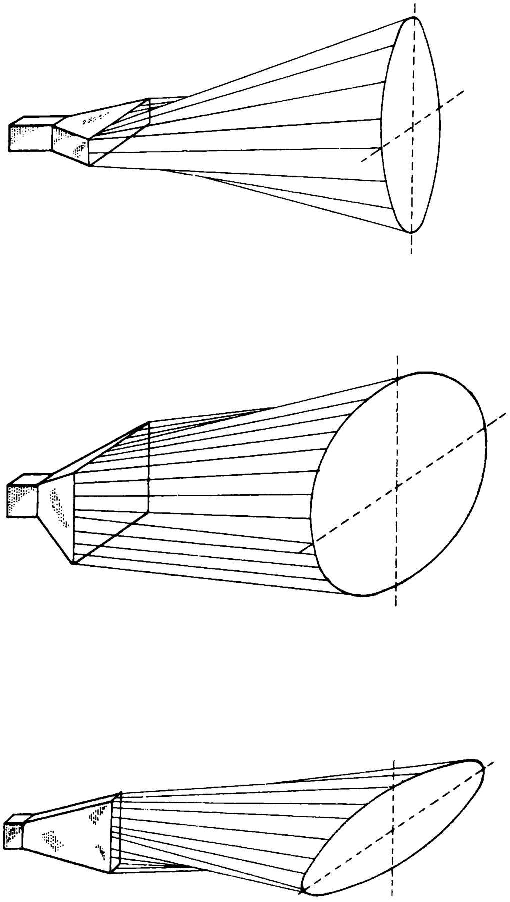


Fig. 2.55. Rayonnements d'antennes à cornet de diverses formes.
Document "Radio Fondamentals".

c) L'antenne à lentilles:

Une lentille diélectrique peut servir à concentrer les rayonnements émis par une source d'ondes situées en son foyer (figure 2.57). L'utilisation des lentilles reste pratique au-dessus de 10 GHz; l'inconvénient majeur reste la puissance dissipée dans la lentille, vu son haut coefficient diélectrique (1,5 – 1,6); au-dessous de 10 GHz, il faut utiliser des lentilles très épaisses, et donc très encombrantes.

Afin de ne pas s'encombrer de lentilles de dimensions trop importantes, nous nous servons de lentilles taillées en escalier. Les diamètres D de celles-ci sont tels que le rapport D/p est proche de 1; p est la distance au foyer de la lentille (figure 2.56). La bande passante est alors beaucoup plus étroite car l'espace t entre les marches d'escalier est étroitement lié à la longueur d'onde d'émission.

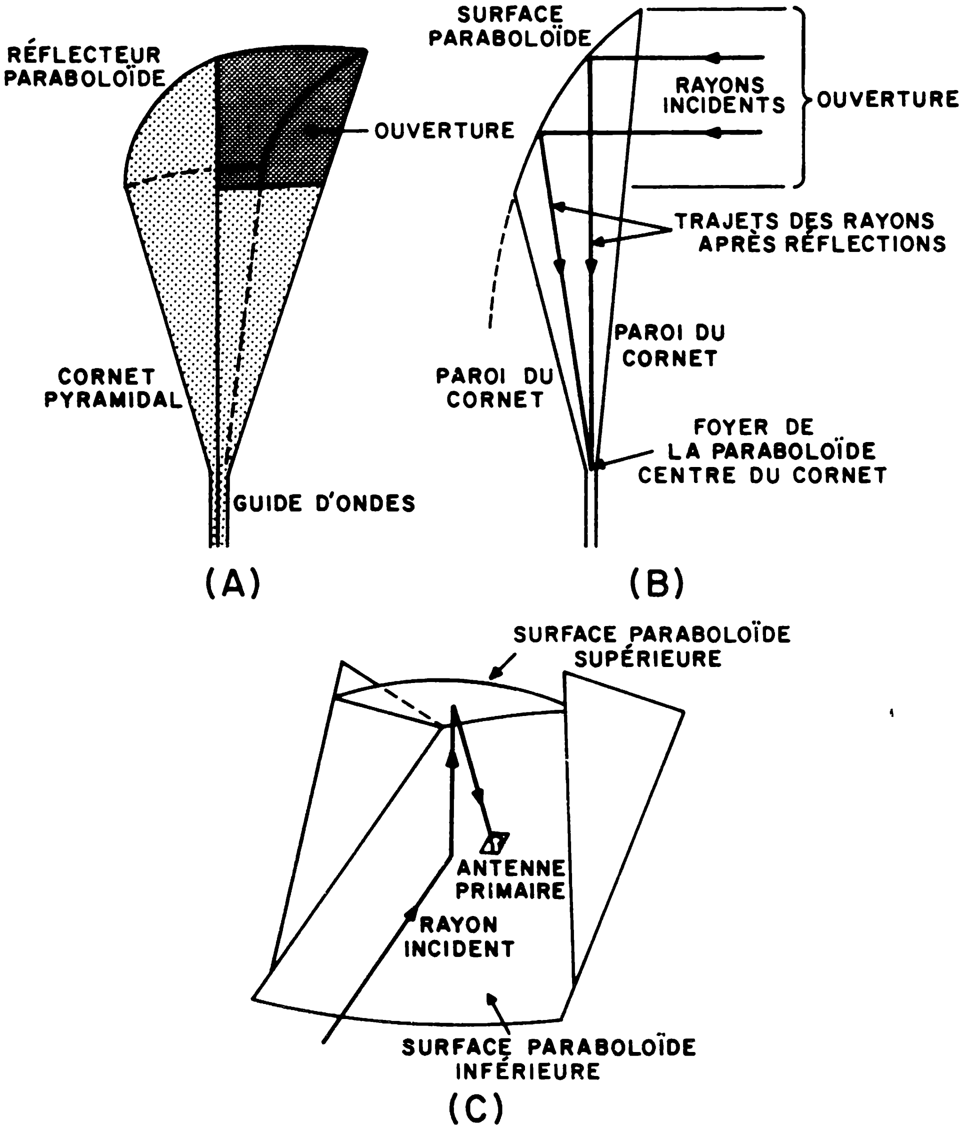


Fig. 2.56. Antenne à cornet.
A - Vue en perspective.
B - Trajectoire de rayons incidents.
C - Trajectoire des rayonnements dans une antenne à cornet à double surface paraboloïde.

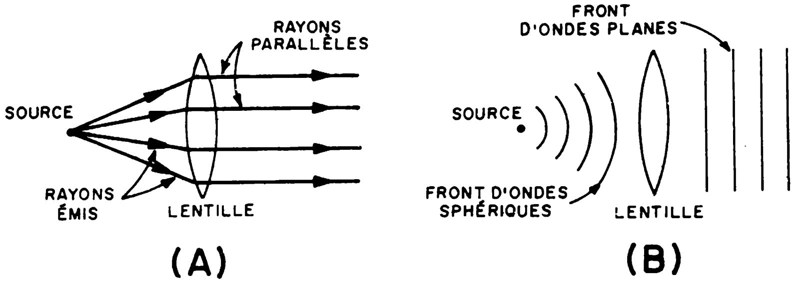


Fig. 2.57. Fonctionnement d'une antenne à lentille (a) et front d'ondes correspondant (b).

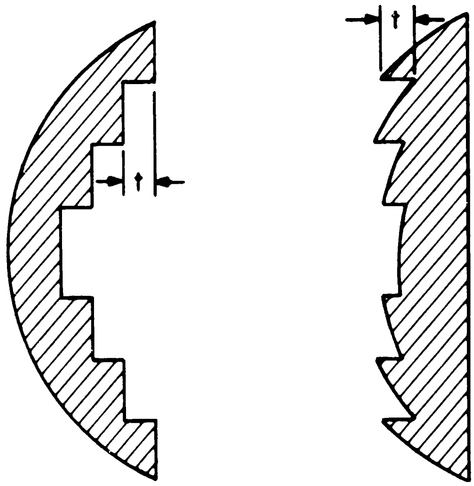


Fig. 2.58. Exemples de lentilles taillées en escalier.

6. ANTENNES SPECIALES

Nous présenterons ici quelques antennes pouvant être utilisées à diverses fins: l'antenne hélicoïdale, l'antenne discône, l'antenne log périodique, et l'antenne à boucle.

a) L'antenne hélicoïdale:

L'antenne hélicoïdale (fig. 2.59) est utilisée en fréquences VHF et UHF, pour la communication par satellite.

En raison de sa constitution, l'antenne hélicoïdale émet une onde à polarisation circulaire. Cette onde pourra être captée par une antenne verticale ou horizontale.

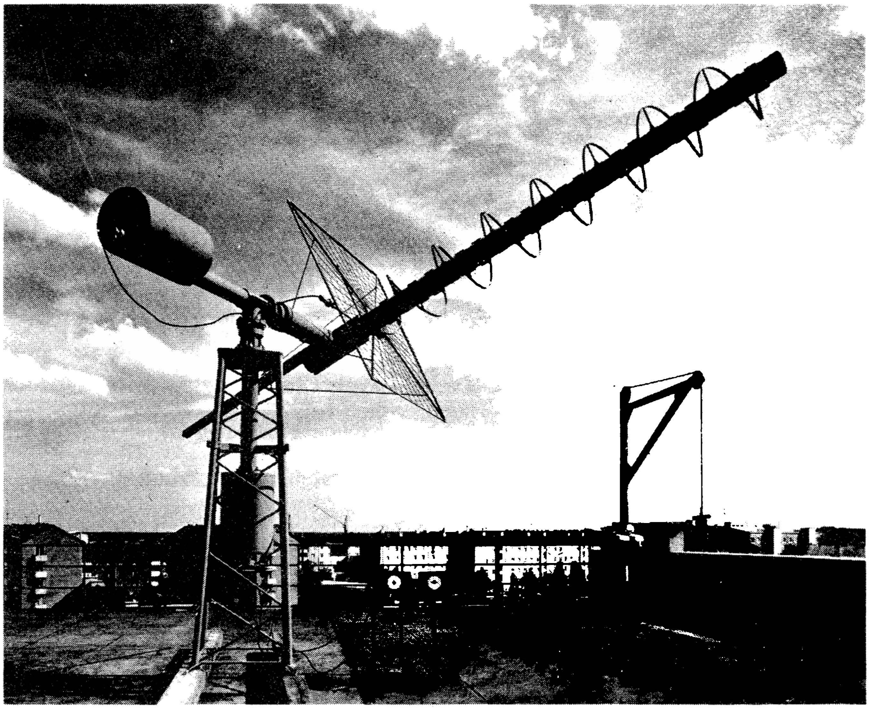


Fig. 2.59. Antenne hélicoïdale. (Document Mc Graw-Hill)

La circonférence des spires est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde émise λ. Une terre artificielle de surface correspondant à une longueur d'onde au carré est placée à la base de cette antenne. La figure 2.60 présente les dimensions standard d'une telle antenne.

La résistance de rayonnement est de 140 Ω; son gain de directivité typique est 70, sa largeur de faisceau totale 50° et sa bande passante atteint 40% de la fréquence principale.

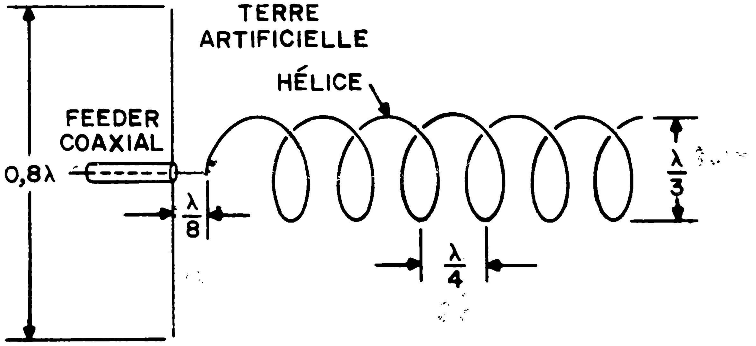


Fig. 2.60. Dimensions d'une antenne hélicoïdale.

b) L'antenne discône

L'antenne discône est formée d'un disque et d'un cône très rapprochés (fig. 2.61). Cette antenne a les mêmes caractéristiques qu'une antenne Marconi car le cône et le disque jouent le rôle d'une terre artificielle. Elle est utilisée en VHF et UHF, plus rarement en HF.

De gain faible, cette antenne est omnidirectionnelle et présente l'avantage d'avoir une bande de fréquence considérable; elle est utilisée dans certains aéroports car elle permet de communiquer avec des appareils venant de différentes directions et émettant sur différentes fréquences.

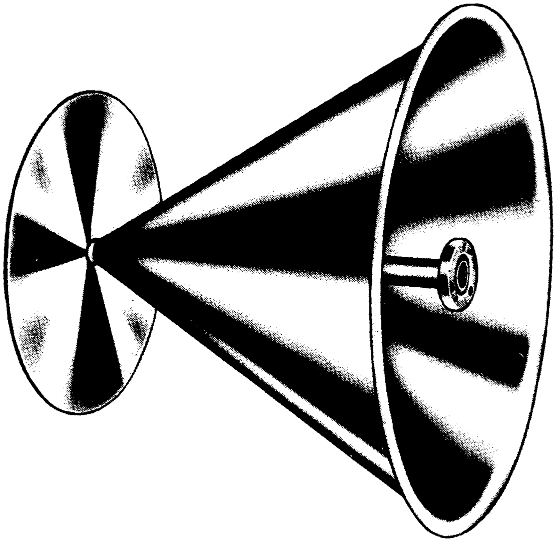


Fig. 2.61. Antenne discône. (Document Mc Graw-Hill)

La résistance de rayonnement est 50 Ω et ses dimensions caractéristiques sont représentées à la figure 2.62.

c) L'antenne log-périodique:

L'antenne log-périodique est une antenne multiondes ou multibandes, c'est-à-dire une antenne pouvant desservir plusieurs bandes de fréquences. Il n'y a pas une version mais un très grand nombre de versions d'antennes log-périodiques caractérisées par un gain moyen (6 à 10 dB), un rayonnement unidirectionnel ou bidirectionnel et une bande de fréquences contenant des fréquences dont le rapport peut varier de 1 à 10, parfois même 20.

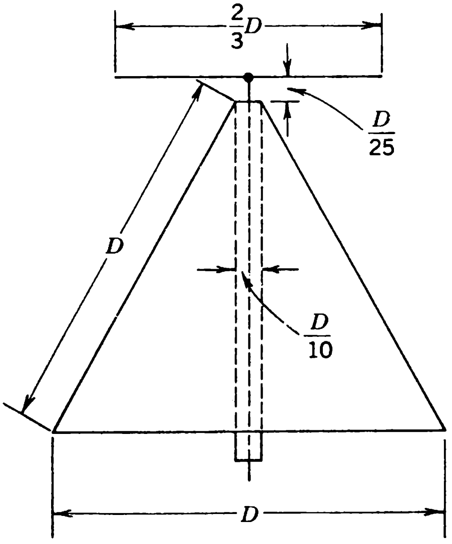


Fig. 2.62. Dimensions d'une antenne discône.

L'antenne dipôle log-périodique est représentée à la figure 2.63: nous remarquons qu'il y a une régularité de structure des différents dipôles alimentés par la même ligne. Les séparations consécutives R_1 R_2, etc., entre les différents dipôles, ainsi que les longueurs consécutives ℓ_1, ℓ_2, ℓ_3, etc., sont telles que:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_2}{R_3} = \frac{R_3}{R_4} = \tau = \frac{\ell_1}{\ell_2} = \frac{\ell_2}{\ell_3} = \frac{\ell_3}{\ell_4}$$

le nombre τ étant légèrement inférieur à 1. Les lignes joignant les extrémités des dipôles forment un angle α dont la valeur type est 30°. Les fréquences maximale et minimale sont déterminées par les longueurs des dernier et premier dipôles; le dipôle de rayonnement maximal est celui qui correspond à la longueur d'onde utilisée.

L'impédance d'entrée d'une telle antenne, représentée sur un graphe logarithmique en fonction de la fréquence, donne une courbe à variations périodiques, d'où le nom de l'antenne.

Cette antenne est utilisée principalement en HF et possède, par rapport à l'antenne rhombique, l'avantage de ne pas dissiper une grande partie de la puissance fournie sur une résistance. Des antennes de ce type ont été conçues pour la réception en télévision avec l'avantage d'une antenne unique pour tous les canaux, y compris les canaux en UHF.

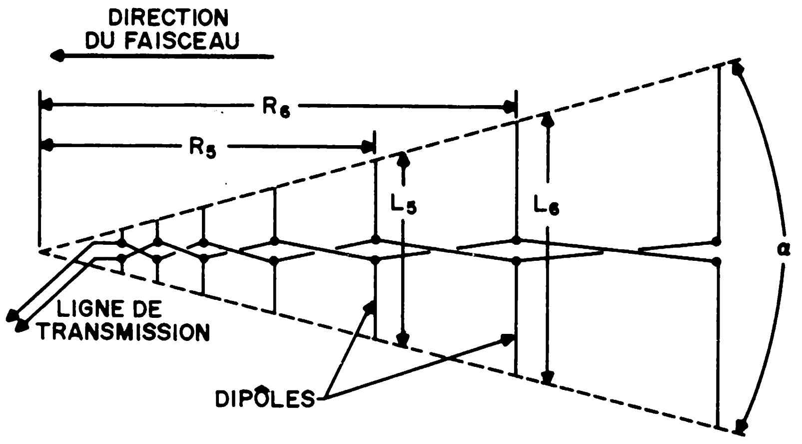


Fig. 2.63. Antenne dipôle log-périodique.

Un autre exemple d'antenne log-périodique est l'antenne spirale équiangulaire représentée à la figure 2.64: la radiation émise à partir du centre de l'antenne suit un parcours en spirale au cours duquel elle entre en résonance: ceci se produit lorsque l'écart atteint correspond à la moitié de la longueur d'onde émise.

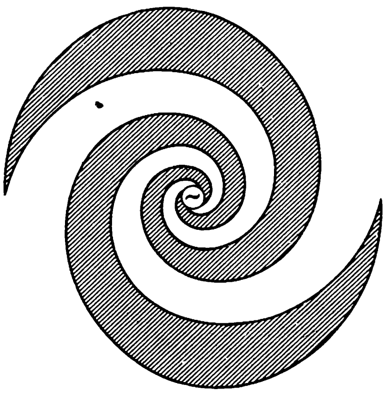


Fig. 2.64. Antenne spirale équiangulaire.
Document "J. Wiley".

d) L'antenne à boucle :

L'antenne à cadre ou à boucle circulaire (fig. 2.65) est utilisée en navigation en fréquences MF afin de déterminer la direction d'une source émettrice. Les dimensions de cette antenne sont minimes par rapport à la longueur d'onde: le courant est donc identique le long de la boucle.

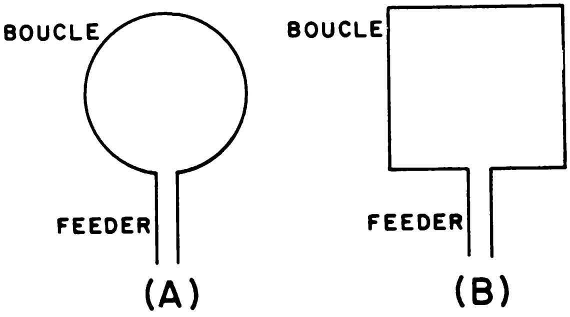


Fig. 2.65. L'antenne à boucle:
A. circulaire,
B. à cadre carré.

L'intensité de champ électrique E à une distance d d'une antenne à boucle est donnée par la relation:

$$E = \frac{120\,\pi^2}{d}\ N\ \frac{A}{\lambda^2}\ I \cos\theta \qquad (2\text{-}15)$$

N étant le nombre de spires de la boucle, A sa surface, I le courant circulant dans la boucle et θ l'angle existant entre le plan de la boucle et la direction de l'emplacement de la mesure.

La résistance de rayonnement R d'une antenne à boucle est en général faible et est donnée par la relation:

$$R = 31\,200\ N\left(\frac{A}{\lambda^2}\right)^2 \qquad (2\text{-}16)$$

Le diagramme de rayonnement obtenu est semblable à celui du dipôle simple à la différence près que, pour une boucle horizontale, la polarisation est verticale, et que pour une boucle verticale, la polarisation est horizontale.

La tension induite dans une antenne à boucle est donnée par la relation:

$$v = 2\pi\ E\ N\ \frac{A}{\lambda}\ \cos\theta \qquad (2\text{-}17)$$

E représente l'intensité de champ existant près de la boucle.

Remarquons que la tension induite dépend de l'angle θ que fait le plan de la boucle (cette fois-ci réceptrice) avec la direction de l'émetteur, d'où la propriété directionnelle: la tension induite est nulle lorsque le plan de la boucle est perpendiculaire à la direction de l'émetteur.

Le nombre de spires N a pour effet, d'autre part, d'augmenter la surface effective de la boucle NA. Ceci donne la possibilité de construire des détecteurs portatifs contenant une boucle à grand nombre de spires.

Exemple: Une antenne isotropique de coefficient d'efficacité 0,8 émettant sur une fréquence de 500 kHz reçoit une puissance électrique moyenne de 100 kW. A une distance de 50 km de l'émetteur se trouve une antenne à boucle dont la surface est 20 cm^2 et le nombre de spires 20. Trouver la tension maximale induite dans cette antenne.

La puissance de rayonnement moyenne de l'antenne sera:

$$P_t = \eta \cdot P_e = 0{,}8 \times 10^5 = 80\,\text{kW}$$

La densité de puissance de rayonnement à une distance de 100 km sera:

$$p_r = \frac{P_t}{4\pi d^2} = \frac{80.10^3}{4\pi \times (5 \times 10^4)^2} = 2{,}5\,\mu\text{W/m}^2$$

L'intensité de champ électrique correspondant sera:

$$p_r = \frac{E^2}{120\,\pi}$$

$$E = \sqrt{p_r \times 120\,\pi} = 30{,}9\,\text{mV/m}$$

La longueur d'onde émise est:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.10^8}{5.10^5} = 600\,\text{m}$$

La tension maximale induite dans l'antenne boucle est obtenue pour cos θ = 1 soit:

$$v = 2\pi \; E \; N \; \frac{A}{\lambda}$$

$$= 2\pi \; 30{,}9 \times 10^{-3} \times 20 \times \frac{(20 \times 10^{-4})}{600} = 12{,}9\,\mu\text{V}$$

7. ANTENNES UTILISEES SELON LES FREQUENCES:

Aux basses fréquences VLF et LF, nous avons recours à des antennes Marconi en nappe, souvent branchées à une terre artificielle faite de conducteurs à la base de celles-ci.

Les fréquences MF correspondent aux fréquences radio en modulation d'amplitude (AM) et sont émises à partir d'antennes Marconi.

Aux fréquences HF, nous utilisons l'antenne rhombique ou l'antenne log-périodique. Les antennes dipôles repliés et les différents groupements d'antennes peuvent être aussi utilisés. L'expérience montre qu'un conducteur horizontal de 39,6 m de long et placé aussi haut que possible constitue une excellente antenne de réception pour des fréquences s'étageant de 3,5 MHz à 20 MHz et qui représentent des fréquences HF.

Aux fréquences VHF, les divers groupements d'antennes avec dipôles simples ou repliés sont utilisés: ce sont les antennes Yagi auxquelles on adapte parfois des moteurs rotatifs afin d'orienter leur rayonnement.

Les fréquences VHF et UHF peuvent être émises à partir d'antennes log-périodiques, discônes ou hélicoïdales.

Pour les fréquences supérieures SHF et EHF, nous employons les antennes paraboloïdes, les antennes à cornet ou les antennes à lentille.

D- INSTALLATION D'UNE ANTENNE (radio ou TV)

L'accent dans ce texte sera mis sur l'installation des antennes réceptrices de radio et de télévision.

Pour la modulation d'amplitude AM, nous utilisons une ferrite de petite dimension ayant de faibles pertes diélectriques et permettant de concentrer les lignes de champ. Cette ferrite, de quelques centimètres de long, est installée à même le récepteur; une bobine inductive encerclant cette ferrite permet d'adapter l'antenne.

Installer une antenne pour modulation de fréquence FM, ou pour la télévision, exige de prendre en considération des effets mécaniques tels que le poids, la résistance au vent et à la corrosion, et des effets techniques tels que les divers moyens d'acheminer l'énergie électrique induite dans l'antenne aux bornes du récepteur.

1. CONSIDERATIONS TECHNIQUES

Envisageons tout d'abord les **considérations techniques**: analysons un exemple de **choix d'antenne.**

a) Exemple de choix d'antenne:

Pour la réception d'un émetteur dans le canal européen E9 (202 - 209 MHz), on doit choisir l'antenne de façon à ce que la tension d'entrée sur le récepteur dépasse 180 μV pour obtenir une bonne image. En outre, l'intensité du champ sur place est de 200 μV/m.

La fréquence moyenne utilisée est: $\frac{202 + 209}{2} = 205{,}5$ MHz, correspondant à une longueur d'onde $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.10^8}{2205{,}5 \, . \, 10^6} = 1{,}46$ m.

Pour que la tension induite ne soit pas noyée dans le bruit et que les pertes de puissance dans la ligne de transmission soient prises en considération, exigeons une tension induite double sur l'antenne, soit: 2 x 180 μV = 360 μV.

La hauteur effective de l'antenne h_e peut être obtenue à partir de la relation

$$v = E \, . \, h_e$$

$$h_e = \frac{v}{E} = \frac{360.10^{-6}}{200.10^{-6}} = 1{,}8 \text{ m}$$

Si nous choisissons une antenne Yagi, le gain de celle-ci devra être:

$$h_e = \frac{\lambda}{\pi} D \qquad (2\text{-}13)$$

D'où:

$$D = \frac{h_e \, . \, \pi}{\lambda} = \frac{1{,}8 \, . \, 3{,}14}{1{,}46} = 3{,}85$$

Ce gain correspondrait à une antenne Yagi de trois éléments (voir fig. 2.37A).

b) Choix de la ligne de transmission:

La ligne de transmission utilisée doit avoir une impédance caractéristique bien définie afin d'être adaptée et en mesure de transmettre le maximum d'énergie électrique. Son taux de rayonnement dans l'espace sera aussi faible que possible.

Deux types de lignes sont utilisés: le câble bifilaire plat et le câble coaxial.

Le câble bifilaire plat (fig. 2.66A) est un système de deux conducteurs, de diamètre identique se trouvant partout à la même distance l'un de l'autre. Les conducteurs sont maintenus par un surmoulage de polyéthylène dont les qualités diélectriques sont excellentes.

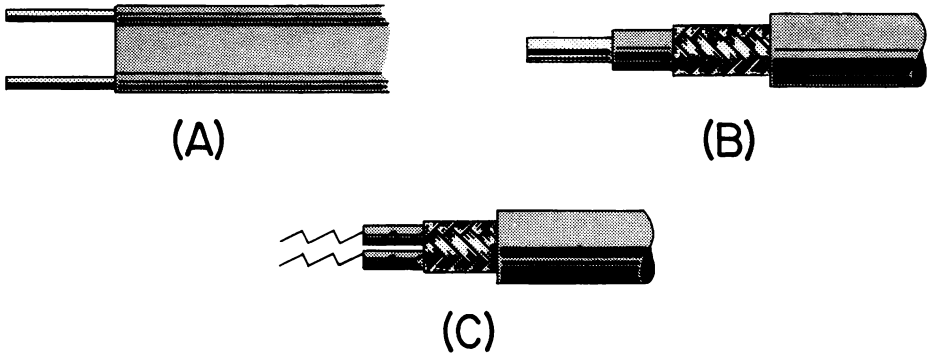


Fig. 2.66. A. Câble bifilaire 300 Ω.
B. Câble coaxial 72 Ω.
C. Câble bifilaire blindé.

L'impédance d'un tel câble est environ 300 Ω; sa valeur exacte est donnée par la relation:

$$Z = 276 \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \log \frac{B}{2A} \qquad (2\text{-}18)$$

μ est la perméabilité du conducteur

ϵ est la constante diélectrique ou permitivité du matériau séparant les conducteurs

B est la distance (entre axes) des deux conducteurs

2A est le diamètre des conducteurs

La formule précédente est correcte dans le cas où le rapport B/2A est très grand; dans le cas contraire, la résistance d'antenne diminue. Le tableau 6 montre le pourcentage de diminution dû à différents rapports B/2A.

TABLEAU 6
Ecarts de résistance dus au rapport B/2A plus petits dans un câble.

B/2A	Ecarts de résistance
20	0,5 %
5	4 %
2,5	20 %
2	40 %

Le **câble bifilaire plat** présente l'inconvénient d'être trop sensible aux parasites et d'avoir une faible résistance aux influences atmosphériques: le soleil agit sur le polyéthylène, ce qui augmente les pertes, tandis qu'en hiver, en cas de gelée, le conducteur devient très rigide de sorte qu'il se produit des fendillements qui entraînent à leur tour des pertes. La mise en place d'un câble bifilaire exige l'emploi d'isolants afin de le tenir éloigné de tout objet ou paroi métallique. Ces inconvénients sont minimes lorsque le câble bifilaire est installé à l'intérieur d'une maison. Les pertes d'énergie pour un câble de 100 mètres de longueur correspondent à une atténuation moyenne de 4 dB à 50 MHz, 7,5 dB à 200 MHz et 14,4 dB à 500 MHz.

Nous utilisons aussi un tube creux bifilaire, résistant mieux aux conditions atmosphériques, mais ce câble est plus coûteux et son montage plus difficile.

Le **câble coaxial** se compose d'un conducteur central enfermé dans une gaine métallique constituant le deuxième conducteur, laquelle est connectée à la terre. L'espace entre les deux est rempli de polyéthylène comme diélectrique (fig. 2.66B).

L'impédance d'un câble coaxial est donnée par la formule:

$$Z = 138 \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \log \frac{B}{2A} \text{ ohms} \qquad (2\text{-}19)$$

B : diamètre du conducteur extérieur

2A : diamètre du conducteur intérieur

Cette impédance a pour valeur moyenne 72 Ω; l'atténuation de puissance est plus importante que dans le câble bifilaire: de 6,2 dB à 50 MHz, 11 dB à 100 MHz, 15 dB à 200 MHz et 30,5 dB à 800 MHz. Ce câble présente l'avantage d'être plus flexible, mais il est plus coûteux et est utilisé surtout lorsqu'il y a possibilité de parasitage.

L'adaptation d'impédance doit être parfaite, surtout en UHF. Le manque d'adaptation cause de nombreux problèmes: images fantômes en télévision, perte de signal et altération des caractéristiques de l'antenne, et notamment dispersion dans son diagramme de rayonnement. Si cela est nécessaire, nous employons un système adaptateur d'impédance (transformateur par exemple).

2. CONSIDERATIONS MECANIQUES

Passons aux **considérations mécaniques**: celles-ci s'étendent de la résistance au vent et à la corrosion, à la nature des haubans utilisés, à la fixation de l'antenne au mât, et à la position et l'orientation de celle-ci.

L'antenne doit être installée de façon assez solide sur un mât qui devra supporter le poids de l'antenne — et éventuellement celui d'oiseaux — et résister aux pressions latérales du vent.

Pour résister aux perturbations dues aux réflexions (fig. 2.67) il est recommandé d'avoir une antenne directive que l'on orientera jusqu'à réception maximale. Afin d'éviter des perturbations dues aux bruits électromagnétiques engendrés par les moteurs d'automobile ou autres machines, l'antenne devra être placée aussi haut que possible.

Le **mât d'antenne** pourra être fixé à même la paroi d'une cheminée ou d'un mur (fig. 2.68A, 2.68D) ou maintenu au moyen d'haubans (fig. 2.68B) ou monté sur une tour (fig. 2.68C).

Comme **haubans**, nous pourrons utiliser du fil de fer galvanisé de 2 à 3 mm d'épaisseur, mais celui-ci rouille très vite. Le fil téléphonique de 2 à 2,5 mm d'épaisseur peut servir aussi, mais a l'inconvénient de s'allonger. Un fil d'acier torsadé avec gaine en PVC (chlorure de polyvinyle) est très bon, de même qu'un fil en PVC (corde en plastique).

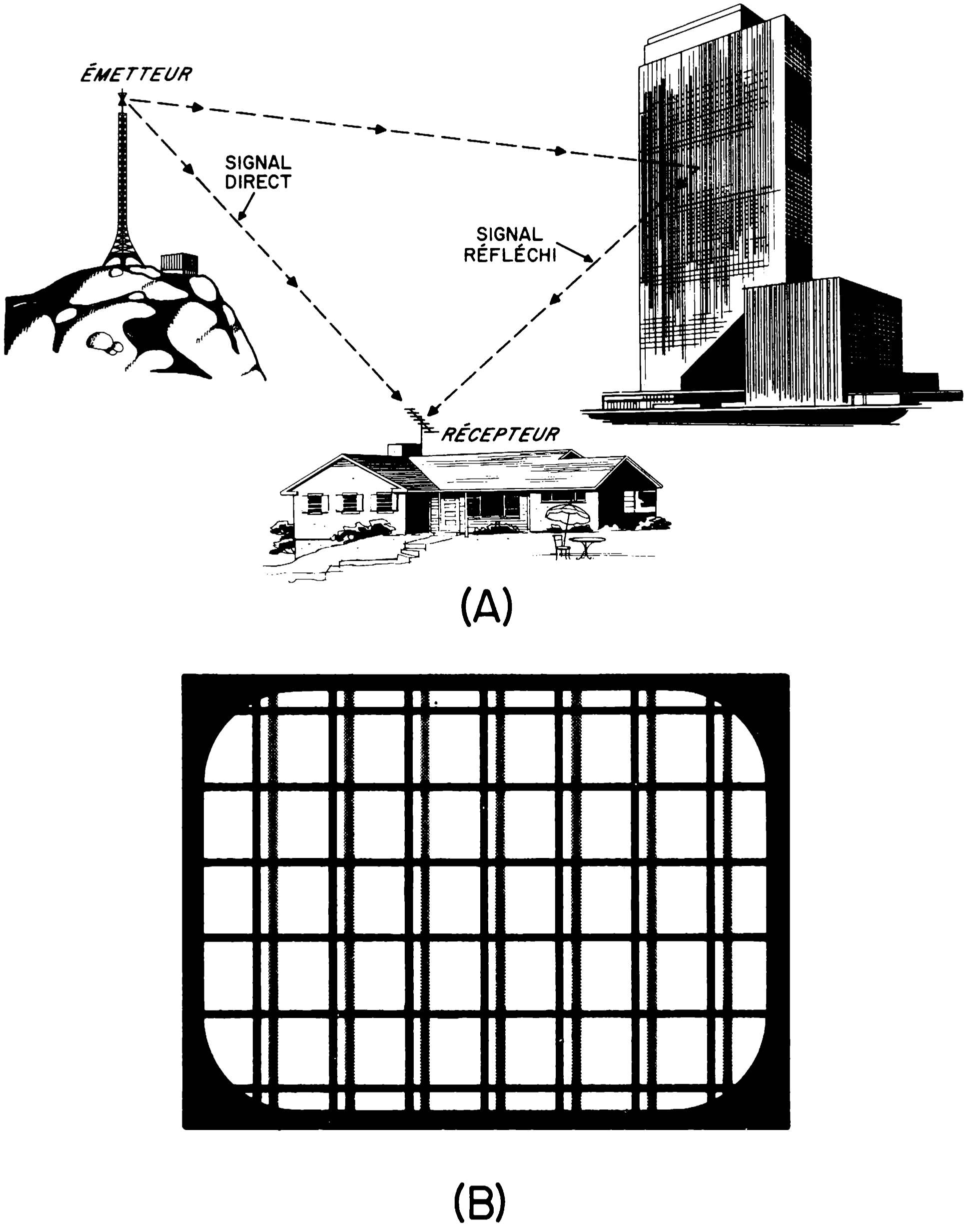


Fig. 2.67. Quand le signal est réfléchi par un édifice, il peut être reçu en double. Le second signal est toutefois en retard et produit une image fantôme.
(A) (Document Mc Graw-Hill)

Des tendeurs pourront être utilisés afin d'éviter le démontage des fils en cas de correction éventuelle de la tension des haubans. Le tendeur à vis (fig. 2.69) permet un verrouillage qui pourra être renforcé par un contre-écrou pour éviter le relâchement.

La figure 2.70 présente un montage mât hauban type; la figure 2.71, celle d'une tour d'antenne.

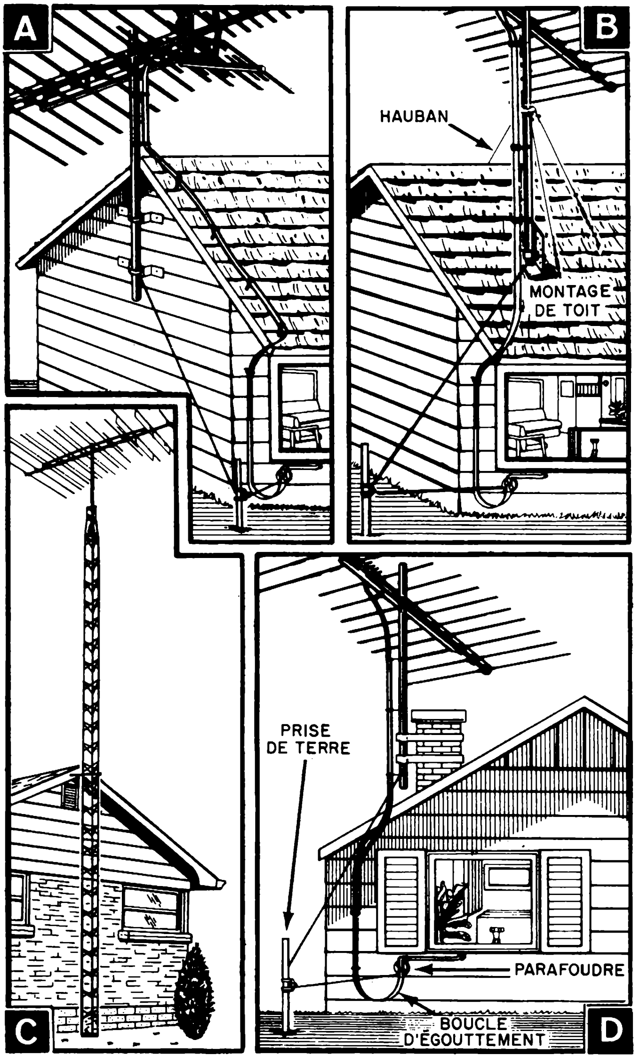


Fig. 2.68. Les principaux types d'installation d'antenne.

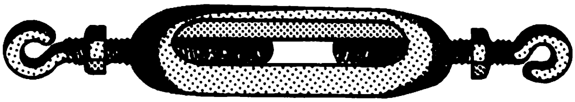


Fig. 2.69. Tendeur à vis pour haubans.

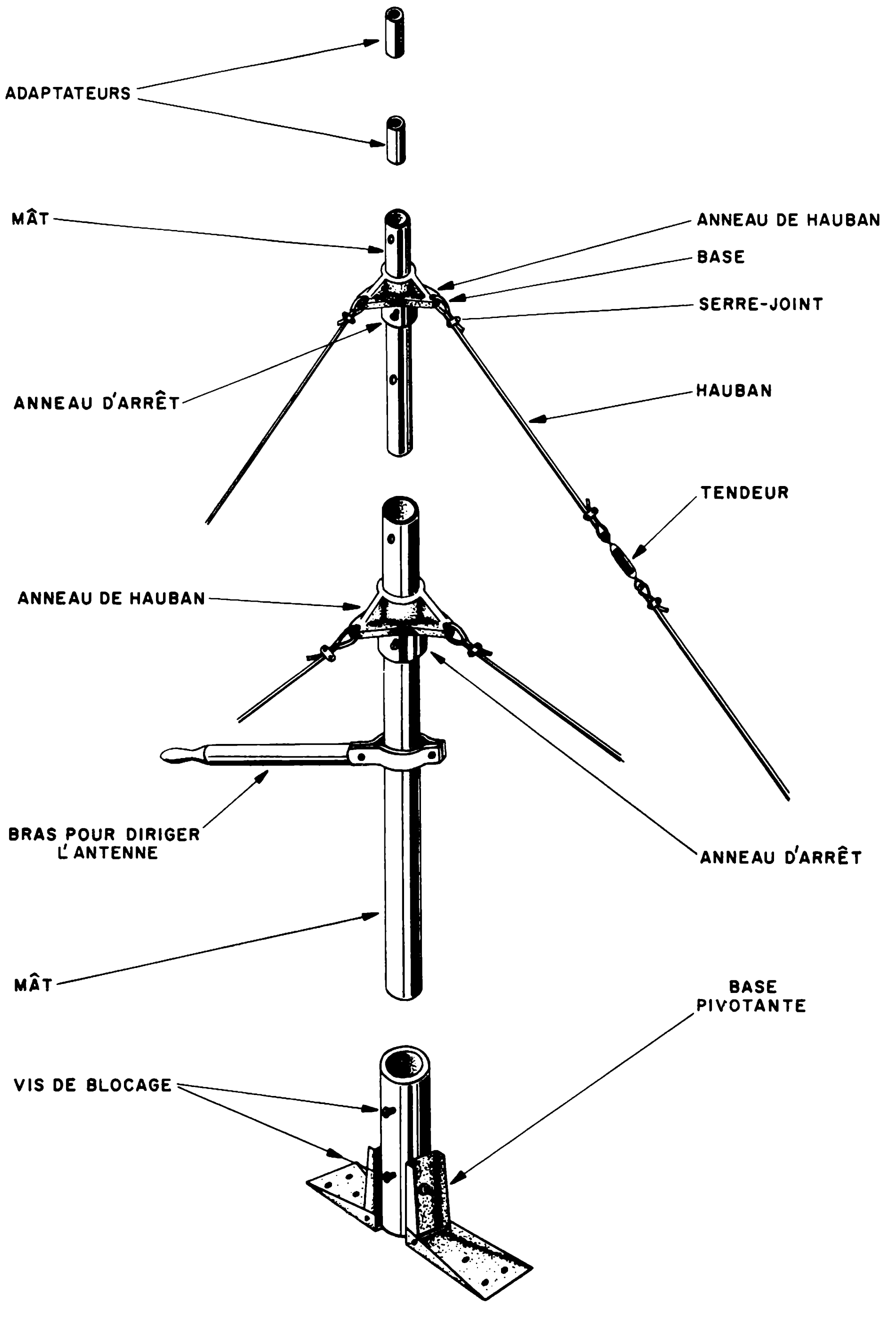


Fig. 2.70. Installation des haubans sur un mât d'antenne.

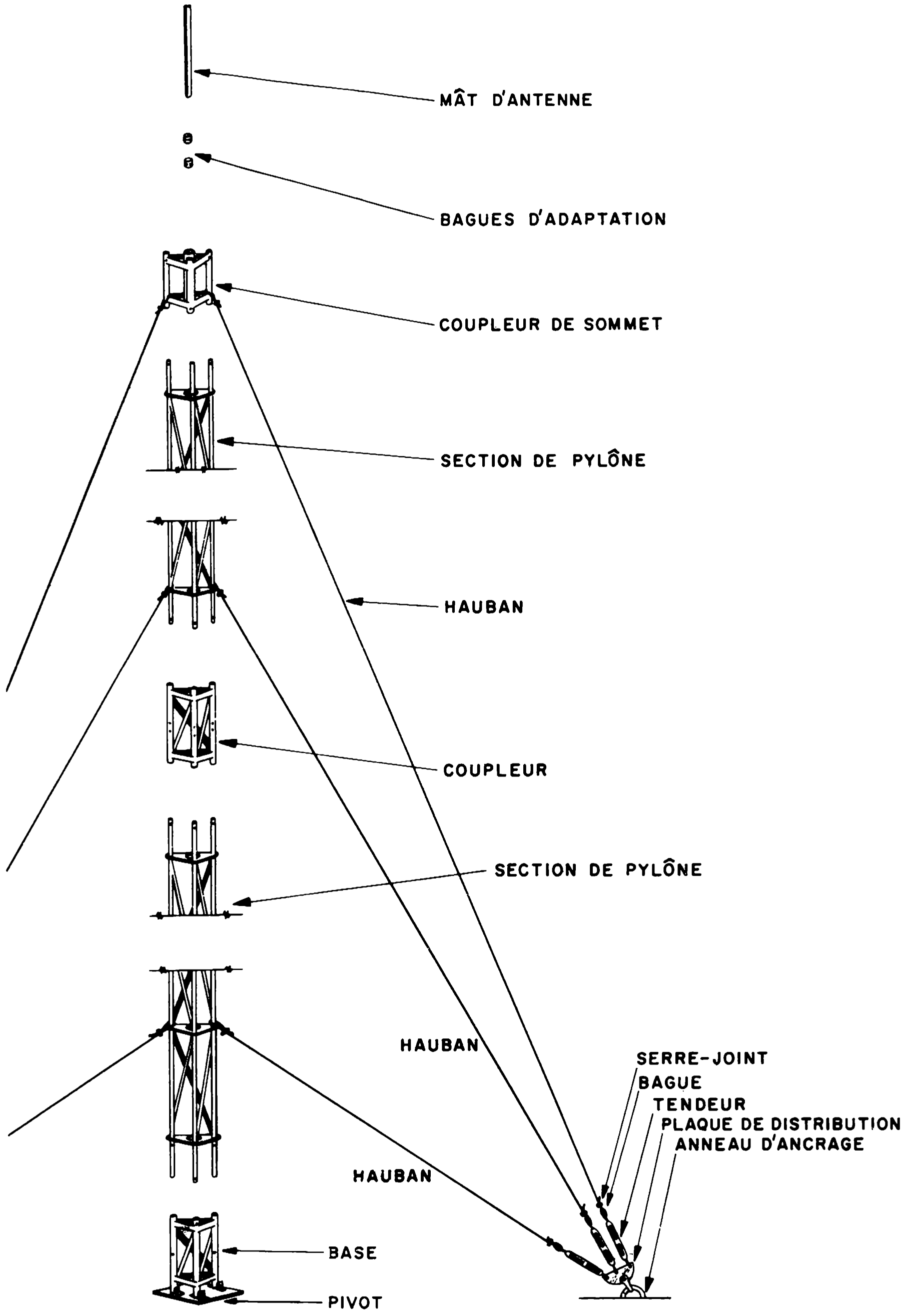


Fig. 2-71 - Pylône d'antenne

La fixation de l'antenne au mat se fera par une liaison à vis en fer galvanisé ou cadmié; ce revêtement est destiné à empêcher la rouille; il est recommandé toutefois de vernir ces vis après le montage. La ligne de transmission utilisée devra être isolée du mât d'antenne; la figure 2.72 illustre un exemple de fixation de la ligne de transmission au mât.

Le mât d'antenne doit pouvoir résister à la corrosion due à l'humidité atmosphérique d'une part et aux gaz de combustion qui contiennent des sulfures pouvant être recombinés en acides, d'autre part. Si l'antenne est à proximité d'usines chimiques ou de la mer, il est recommandé de recouvrir le mât d'une couche de peinture à base de chromate de zinc.

3. LES ANTENNES COLLECTIVES

Un intervalle de 5 à 6 longueurs d'ondes entre antennes réceptrices suffirait à perturber réciproquement les récepteurs. Des considérations d'ordre esthétiques ont par ailleurs conduit à l'utilisation commune d'une seule antenne là où les récepteurs sont à une distance relativement réduite. L'antenne commune est branchée à un amplificateur qui a pour but d'amplifier le signal capté (fig. 2.73) car l'énergie d'antenne doit être répartie sur différents récepteurs.

Un réseau de distribution devra tenir compte:

- de l'intensité minimale pour le récepteur le plus éloigné et cela par suite du rapport signal/bruit; pour les récepteurs de télévision, cette valeur est d'environ 500 μV.
- du nombre maximal de récepteurs pouvant être branchés.
- de l'amortissement de l'installation due au câble (approximativement 0,15 dB par mètre de câble à 200 MHz), aux boîtes de distribution (4 dB pour une boîte à deux dérivations, 7 dB pour une boîte à trois dérivations, 9 dB pour une boîte à quatre dérivations), et au branchement du câble (près de 1 dB).

Exemple: Les distributions figurant ci-dessous (fig. 2.74A, 2.74B) utilisent respectivement 30 et 20 mètres de câble.

Pour le premier cas (fig. 2.74A) les pertes pour une dérivation seront:

30 mètres de câble	4,5 dB
1 boîte de distribution à trois dérivations	7 dB
5 boîtes de jonction	5 dB
Total	16,5 dB

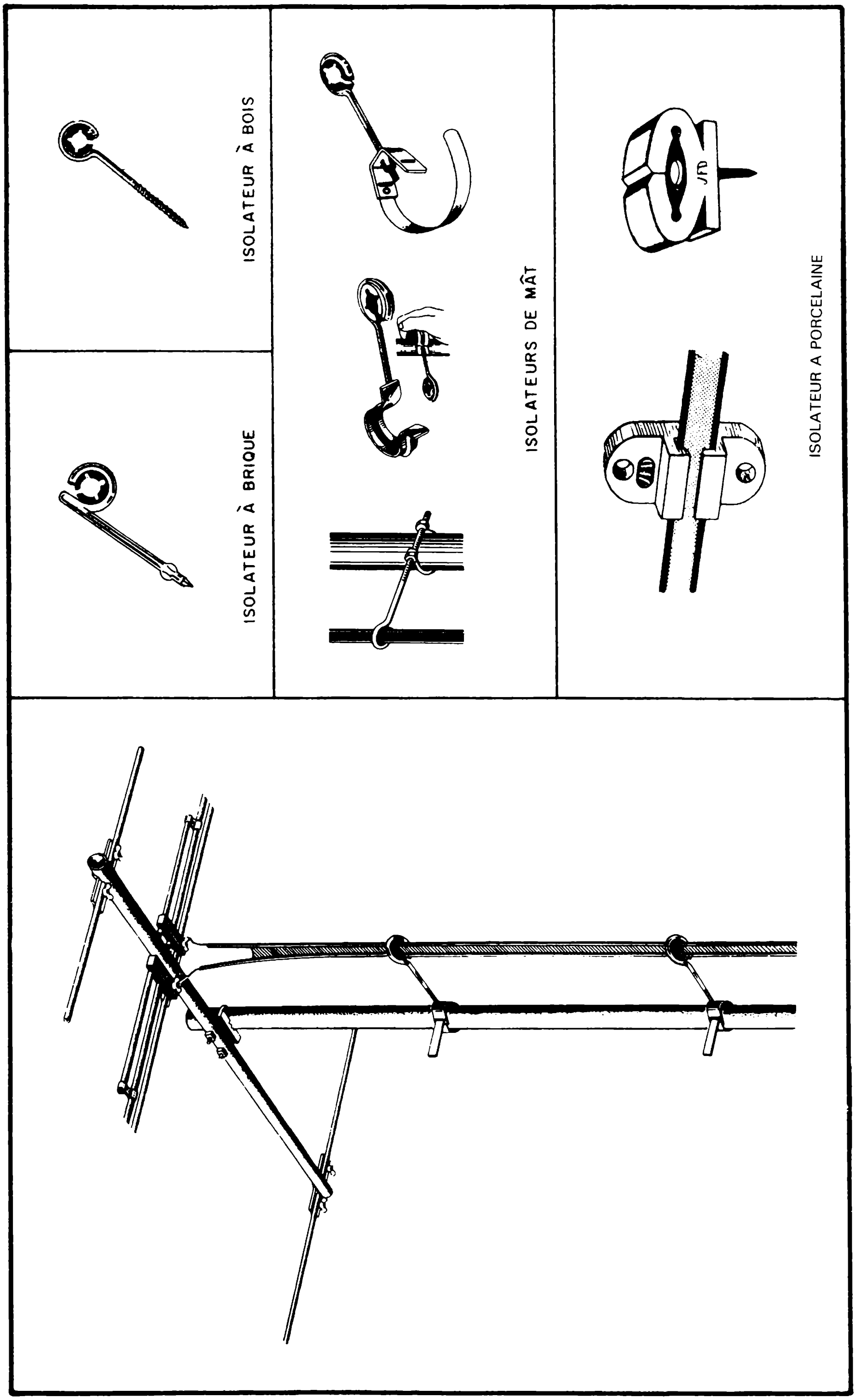


Fig. 2.72. Fixation d'une ligne de transmission au mât à d'aide d'espaceurs de mât (stand off insulator).

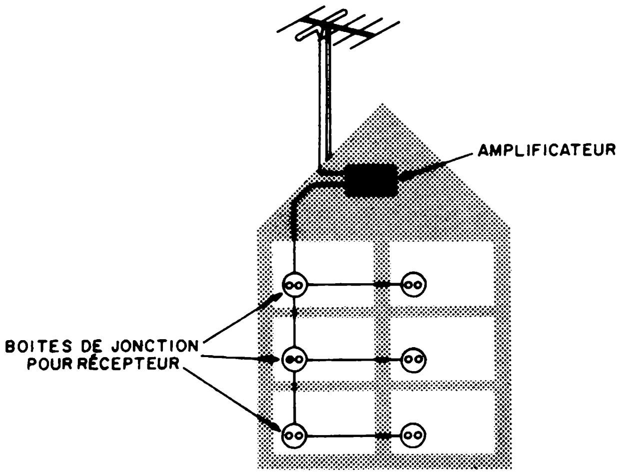


Fig. 2.73. Exemple de réseau de distribution à partir d'une antenne collective.

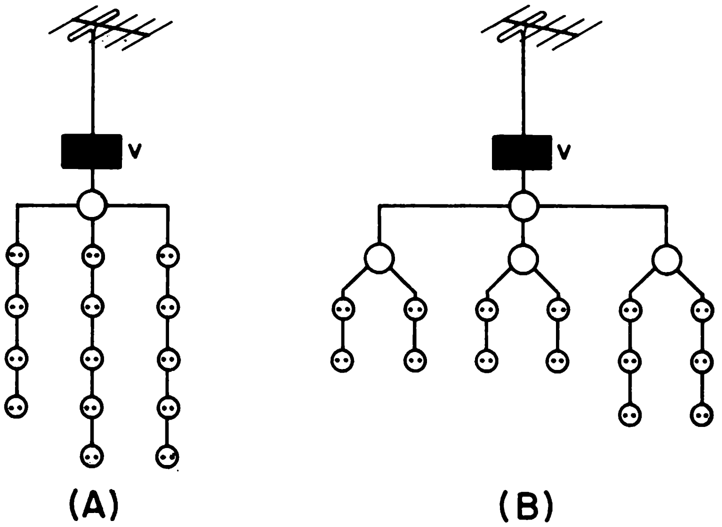


Fig. 2.74. Schéma de réseaux de distribution.

Si la tension à l'antenne est de 1500 μV et qu'aux bornes de chaque récepteur une tension de 500 μV est exigée, cela signifie que la tension d'antenne est triple de celle qui est demandée, soit: 20 log 3 = 9,5 dB. L'amplificateur qui doit être choisi devra amplifier le signal d'antenne de 16,5 − 9,5 = 7 dB, et donc avoir un gain de 5.

Dans le cas de la figure 2.74B, l'atténuation totale sera:

1 boîte à trois dérivations	7 dB
1 boîte à deux dérivations	4 dB
3 boîtes de jonction	3 dB
20 mètres de câble	3 dB
Total	17 dB

L'amplificateur d'antenne devra donc amplifier le signal de cinq à six fois.

4. LES ANTENNES INTERIEURES

Les antennes intérieures permettent d'excellentes réceptions dans des endroits privilégiés (champ très fort, aucune interférence) mais présentent divers inconvénients, à savoir:

— signal recueilli faible, donc rapport signal/bruit plus faible.

— fortes influences de toutes sortes (véhicules circulant dans les environs, rasoir ou appareils ménagers...)

— réception simultanée d'ondes ayant parcouru différents chemins à travers le bâtiment, d'où la possibilité d'interférences.

L'antenne intérieure constitue une solution acceptable, mais il résulte toujours de son utilisation une diminution de la qualité d'image TV.

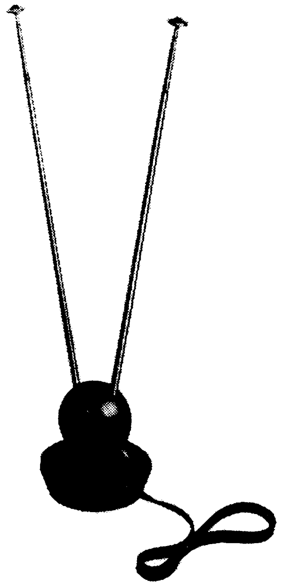


Fig. 2.75. Antenne intérieure.

APPENDICE (I)

LA THEORIE DES CHAMPS

La théorie des champs trouve son application dans plusieurs domaines de la physique: l'hydraulique, l'électrostatique, le magnétisme et l'électromagnétisme. Nous en présenterons les principes fondamentaux.

1. DEFINITIONS:

Une **grandeur scalaire** est une grandeur pouvant être décrite par un nombre; par exemple, la masse ou le volume d'un corps. Une grandeur φ (x, y, z) qui prend une valeur différente pour différents points de l'espace est dite **champ scalaire**; par exemple, la pression atmosphérique ou l'attraction terrestre.

Un **vecteur** est une quantité indiquant une intensité et une direction; par exemple, la force exercée sur un corps ou la vitesse d'un véhicule.

Un **champ vectoriel** est une portion d'espace où l'on peut définir en chaque point un vecteur se rattachant à une certaine propriété; par exemple, la gravitation dans une salle: en chaque point de la salle une masse est soumise à une accélération verticale; celle-ci peut être décrite par un vecteur vertical.

$\vec{a}$ et $\vec{b}$ représentant deux vecteurs quelconque dont les intensités respectives sont $|\vec{a}|$ et $|\vec{b}|$, et qui forment entre eux un angle $(\vec{a}, \vec{b})$, nous définissons:

le **produit scalaire** des vecteurs $\vec{a}$ et $\vec{b}$: $\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos(\vec{a}, \vec{b})$

le **produit vectoriel** des vecteurs $\vec{a}$ et $\vec{b}$: $\vec{a} \wedge \vec{b}$ dont la mesure est:

$|\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \quad \sin(\vec{a}, \vec{b})$

Le produit scalaire est une grandeur scalaire, tandis que le produit vectoriel est un vecteur perpendiculaire au plan formé par les deux vecteurs $\vec{a}$ et $\vec{b}$ et dont le sens est celui de la progression d'un tournevis subissant une rotation de $\vec{a}$ à $\vec{b}$.

Une **ligne de champ** est une ligne dont les tangentes en chaque point représentent le vecteur caractéristique de ce champ en chacun de ces points.

Un **tube de flux** est la surface formée par l'ensemble des lignes de champ passant par tous les points d'une courbe fermée.

Le **flux** $d\phi$ **dans un champ de vecteur** est une grandeur scalaire: c'est le produit scalaire d'un élément de surface $d\vec{S}$ et du vecteur $\vec{a}$ caractéristique du champ. L'élément de surface $d\vec{S}$ est représenté par un vecteur normal à cette surface. Le flux est positif ou négatif selon que le flux total sort ou rentre de cette surface.

$$d\phi = \vec{a} \cdot d\vec{S}$$

Pour une surface fermée S, le flux est exprimé par:

$$\phi = \oint_{(S)} \vec{a} \cdot d\vec{S}$$

Un vecteur $\vec{a}$ est à **flux conservatif** lorsque le flux total à travers une surface fermée est nulle.

La **circulation d'un vecteur** $\vec{a}$ le long d'une courbe dl est une grandeur scalaire exprimée par:

$$dC = \vec{a} \cdot d\vec{l}$$

Pour un arc de courbe L, la circulation totale du vecteur $\vec{a}$ est:

$$C = \int_{O}^{L} \vec{a} \cdot d\vec{l}$$

Ou pour une courbe formée (c):

$$C = \oint_{(C)} \vec{a} \cdot dl$$

La **circulation** d'un vecteur $\vec{a}$ est **conservative** lorsque la circulation totale du vecteur $\vec{a}$ le long d'une courbe fermée est nulle.

2. DEFINITION DES OPERATEURS

Dans ce qui suit, nous décrivons certaines transformations d'une fonction à une autre fonction:

L'opérateur **gradient** transforme une fonction scalaire en fonction vectorielle.

L'opérateur **divergence** transforme une fonction vectorielle en fonction scalaire.

L'opérateur **rotationnel** transforme une fonction vectorielle en fonction vectorielle.

L'opérateur gradient:
Le vecteur gradient $\vec{\nabla}\varphi$ d'un champ scalaire φ dans une direction donnée est la dérivée partielle de φ dans cette direction.

Ce vecteur peut être défini par ses projections sur les axes rectangulaires X, Y, Z, ayant pour vecteurs unitaires respectifs $\hat{i}$, $\hat{j}$, $\hat{k}$ de la façon suivante:

$$\vec{\nabla}\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x}\,\hat{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\,\hat{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\,\hat{k}$$

Ce vecteur représente ,a variation d'une grandeur scalaire dans une direction donnée.

L'opérateur divergence:
La divergence $\vec{\nabla}\,.\,\vec{a}$ d'un vecteur $\vec{a}$ en un point de l'espace représente la variation du flux $d\phi$ de ce vecteur par rapport à un volume élémentaire dV contenant ce point. Ce flux $d\phi$ traverse la surface fermée qui délimite ce volume.

$$\vec{\nabla}\,.\,\vec{a} = \underset{dV \to 0}{\text{limite}} \frac{d\phi}{dV}$$

Son expression analytique est donnée en fonction des projections du vecteur $\vec{a}$ ($\vec{a}_x$, $\vec{a}_y$, $\vec{a}_z$) sur les trois axes (X, Y, Z).

$$\vec{\nabla}\,.\,\vec{a} = \frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z}$$

L'opérateur rotationnel:

Le rotationnel $\vec{\nabla}$ x $\vec{a}$ dans une direction donnée $\vec{dl}$ est la limite de la circulation de $\vec{a}$ autour d'une surface dS normale à $\vec{dl}$ quand dS tend vers zéro: (c) représentant le contour de cette surface dS, nous obtenons:

$$\vec{\nabla} \times \vec{a} = \lim_{dS \to 0} \oint_{(c)} \vec{a} \cdot \vec{dl}$$

ou

$$\vec{\nabla} \times \vec{a} = \left(\frac{\partial a_z}{\partial y} - \frac{\partial a_y}{\partial z}\right)\hat{i} + \left(\frac{\partial a_x}{\partial z} - \frac{\partial a_z}{\partial x}\right)\hat{j} + \left(\frac{\partial a_y}{\partial x} - \frac{\partial a_x}{\partial y}\right)\hat{k}$$

3. THEOREMES FONDAMENTAUX

(1) Le **théorème de Green** stipule que le flux total d'un vecteur $\vec{a}$ sortant d'une surface fermée S est égal à l'intégrale de la divergence de ce vecteur étendue au volume V limité par cette surface.

$$\phi = \oint_{(S)} \vec{a} \cdot d\vec{S} = \int_{(V)} \operatorname{div} \vec{a} \cdot dV$$

(2) Le **théorème de Stokes** stipule que la circulation d'un vecteur $\vec{a}$ le long d'une courbe fermée (c) est égale au flux de son rotationnel à travers une surface quelconque S limitée par cette courbe.

$$\oint_{(c)} \vec{a} \cdot \vec{dl} = \int_{(S)} \vec{\nabla} \times \vec{a} \; d\vec{S}$$

(3) Un flux conservatif a une divergence nulle.

(4) Un vecteur à circulation conservative a un rotationnel nul.

AUTRES RELATIONS

$$\nabla(\Phi + \psi) = \nabla\Phi + \nabla\psi$$

$$\nabla \cdot (\vec{A} + \vec{B}) = \nabla \cdot \vec{A} + \nabla \cdot \vec{B}$$

$$\nabla \times (\vec{A} + \vec{B}) = \nabla \times \vec{A} + \nabla \times \vec{B}$$

$$\nabla(\Phi\psi) = \Phi \nabla\psi + \psi \nabla\Phi$$

$$\nabla \cdot (\psi\vec{A}) = \vec{A} \cdot \nabla\psi + \psi\nabla \cdot \vec{A}$$

$$\nabla \cdot (\vec{A} \times \vec{B}) = \vec{B} \cdot \nabla \times \vec{A} - \vec{A} \cdot \nabla \times \vec{B}$$

$$\nabla \times (\Phi\vec{A}) = \nabla\Phi \times \vec{A} + \Phi\nabla \times \vec{A}$$

$$\nabla \times (\vec{A} \times \vec{B}) = \vec{A}\nabla \cdot \vec{B} - \vec{B}\nabla \cdot \vec{A} + (\vec{B} \cdot \nabla)\vec{A} - (\vec{A} \cdot \nabla)\vec{B}$$

$$\nabla \cdot \nabla\Phi = \nabla^2\Phi$$

$$\nabla \cdot \nabla \times \vec{A} = 0$$

$$\nabla \times \nabla\Phi = 0$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2\Phi$$

$$\nabla(\vec{A} \cdot \vec{B}) = (\vec{A} \cdot \nabla)\vec{B} + (\vec{B} \cdot \nabla)\vec{A} + \vec{A} \times (\nabla \times \vec{B}) + \vec{B}(\nabla \times \vec{A})$$

$$\vec{A} \cdot \vec{B} \times \vec{C} = \vec{B} \cdot \vec{C} \times \vec{A} = \vec{C} \cdot \vec{A} \times \vec{B}$$

$$\vec{A} \times (\vec{B} \times \vec{C}) = \vec{B}(\vec{A} \cdot \vec{C}) - \vec{C}(\vec{A} \cdot \vec{B})$$

$$\int_S \nabla \times \vec{A} \cdot \vec{dS} = \oint_C \vec{A} \cdot \vec{dl}$$ S est la surface limitée par la courbe C.

$$\int_V \nabla \cdot \vec{A}\, dV = \oint_S \vec{A} \cdot \vec{dS}$$ Le volume V est limité par la surface S.

APPENDICE (II)

LES LOIS DE MAXWELL

Explications des diverses désignations:

$\vec{E}$: intensité de champ électrique.

$\vec{D}$: vecteur de déplacement (le courant de charge d'un condensateur se prolonge dans le diélectrique de celui-ci par un courant de déplacement de densité $J = \partial D/\partial t$).

$\vec{H}$: intensité de champ magnétique.

$\vec{B}$: Densité de flux magnétique ϕ par unité de surface.

ϕ : flux magnétique.

$$\phi = \int_{(S)} \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

ϵ : permittivité du milieu ($\epsilon = \epsilon_r \epsilon_o$), ϵ_r étant la permittivité relative à celle du vide ϵ_o.

μ : perméabilité du milieu ($\mu = \mu_r \mu_o$), μ_r étant la perméabilité relative à celle du vide μ_o.

$\vec{J}$: densité de courant par unité de surface; celle-ci se divise en courant $\vec{J}_c$ proportionnel au champ électrique E et au courant $\vec{J}_o$ injecté dans le conducteur: $\vec{J} = \vec{J}_o + \vec{J}_c$.

ρ : quantité de charge par unité de volume.

W_e : énergie électrique emmagasinée $W_e = \frac{1}{2} \epsilon E^2$.

W_m : énergie magnétique emmagazinée $W_m = \frac{1}{2} \mu H^2$.

$\vec{P}$: vecteur de Poynting $\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H}$

Equations exprimant les propriétés du milieu:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

$$\vec{J}_c = \rho \vec{E}$$

Première loi:

Un courant de conduction de densité $\vec{J_o}$ ou un courant de déplacement de densité $\vec{J_c} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ provoquent autour d'eux un champ magnétique $\vec{H}$ tel que:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J_o} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Deuxième loi:

Une densité de flux magnétique variable $\vec{B}$ engendre un champ électrique variable $\vec{E}$ tel que:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Troisième loi:

Le flux électrique total $\vec{D}$ dû à une quantité de charge de densité volumique ρ est tel que:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$$

Quatrième loi:

La densité de flux magnétique $\vec{B}$ est toujours à flux conservatif. Autrement dit:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

Le vecteur de Poynting:

Pour un volume V délimité par une surface S, l'on peut établir la relation suivante:

$$\underbrace{-\int_{(V)} \vec{E}\ \vec{J_c}\, dV}_{\text{Energie délivrée à l'intérieur du volume V}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial t}\int_{(V)} (W_m + W_e)\, dV}_{\text{Variation de l'énergie emmagasinée}} + \underbrace{\int_{(S)} (\vec{E} \times \vec{H})\, dS}_{\text{Energie dissipée}}$$

Le vecteur $(\vec{E} \times \vec{H})$ est désigné vecteur de Poynting.

Génération d'une onde électromagnétique:

La variation de courant implique la création d'un champ magnétique; de même, la variation de champ magnétique implique la création d'un champ électrique. Ces deux effets vont de pair. Exprimons les deux premières lois en fonction des champs électriques et magnétiques $\vec{E}$ et $\vec{H}$. Dans le vide, nous aurons:

$$\nabla \times \vec{H} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{E} = - \mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

Combinant ces deux dernières équations, nous pouvons conclure:

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}$$

Ces équations sont des équations d'onde se propageant à la vitesse c avec $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3.10^8$ m/s, c'est-à-dire la vitesse de la lumière.

$$\left(\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \times 10^9} \text{ et } \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ en unités SI}\right)$$

APPENDICE (III)

CALCULS RELATIFS AUX ANTENNES

DIPOLE ELEMENTAIRE

Soit un dipôle élémentaire de longueur $d\vec{\ell}$ traversé par un courant sinusoïdal $I_o\, e^{j\omega t}$. D'après la loi d'ampère, le vecteur potentiel magnétique $\vec{A}$ créé à une distance r du dipôle sera:

$$\vec{A} = \frac{\mu\, I_o\, e^{j\omega t}\, d\vec{\ell}}{4\pi r}$$

Ou, en tenant compte de la vitesse de propagation finie c de la lumière:

$$\vec{A} = \frac{\mu\, I_o\, e^{j\omega\,(t\,-\,r/c)}\, d\vec{\ell}}{4\pi r}$$

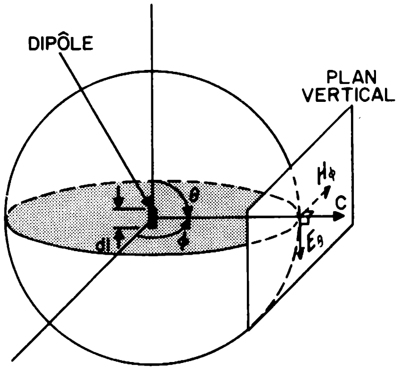
En décomposant $\vec{A}$ sur un système d'axes polaires (r, θ, φ), nous obtenons:

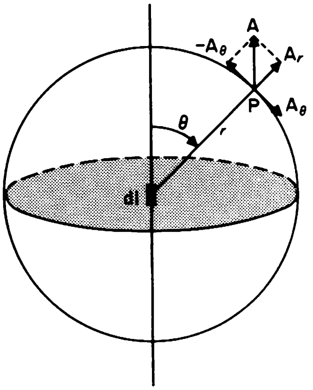
$$A_\theta = -A \sin\theta = -\frac{\mu\, I_o\, e^{j\omega t}\, d\ell}{4\pi r} \sin\theta$$

$$A_\varphi = \quad A \cos\theta = \frac{\mu\, I_o\, e^{j\omega t}\, d\ell}{4\pi r} \cos\theta$$

D'après la théorie des champs, le flux magnétique est conservatif; il est donc le rotationnel du potentiel magnétique $\vec{A}$. $\vec{B}$ et $\vec{H}$ représentant respectivement la densité de flux magnétique et l'intensité de champ magnétique, nous aurons:

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{B} = \mu \vec{H}$$





D'où nous exprimons:

$$H_\varphi = -\frac{1}{r}\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{r\,A_\theta}{\mu}\right) - \frac{\partial}{\partial \theta}\left(\frac{A_r}{\mu}\right)\right]$$

$$= \frac{I_o\, d\ell \sin\theta}{4\pi}\left[-\frac{j\omega\, e^{j\omega(t - r/c)}}{cr} + \frac{e^{j\omega(t - r/c)}}{r^2}\right]$$

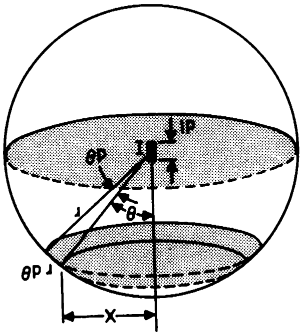
120π étant l'impédance caractéristique de l'espace, nous déduisons l'intensité du champ électrique à partir de l'intensité de champ magnétique rayonnée (et non pas induite) soit:

$$H_\varphi = \frac{I_o\, d\ell\, \sin\theta}{4\pi rc} \cdot j\omega\, e^{j\omega(t - r/c)}$$

D'où: $$E_\theta = 120\,\pi\, H_\varphi = \frac{60\,\pi\, I\, d\ell}{\lambda r} \sin\theta \text{ (valeur efficace)}$$

RESISTANCE DE RAYONNEMENT DU DIPOLE

La puissance dissipée par le champ électromagnétique est donnée par le vecteur de Poynting $\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H}$. En supposant des pertes ohmiques nulles, la résistance de rayonnement R est obtenue en égalisant cette puissance à RI^2, I étant la valeur efficace du courant qui traverse le dipôle.



Sur une surface sphérique située à une distance r sin θ de l'axe du dipôle et s'appuyant sur un arc de cercle r$d\theta$, nous aurons:

$$dP = \frac{E^2}{120\pi} \, . \, 2\pi r^2 \sin\theta \, d\theta$$

Utilisant:

$$E = \frac{60\pi \, I \, d\ell \, \sin\theta}{\lambda r}$$

$$P = \int_o^{\pi} dP = 80\,\pi^2 \left(\frac{d\ell}{\lambda}\right)^2 = R\, I^2$$

D'où:

$$R = 80\,\pi^2 \left(\frac{d\ell}{\lambda}\right)^2$$

ANTENNE DE HERTZ

Les champs électrique et magnétique autour d'une antenne de Hertz se déduisent à partir de ceux du dipôle élémentaire, en intégrant les effets des dipôles élémentaires constituant l'antenne. Le résultat obtenu est:

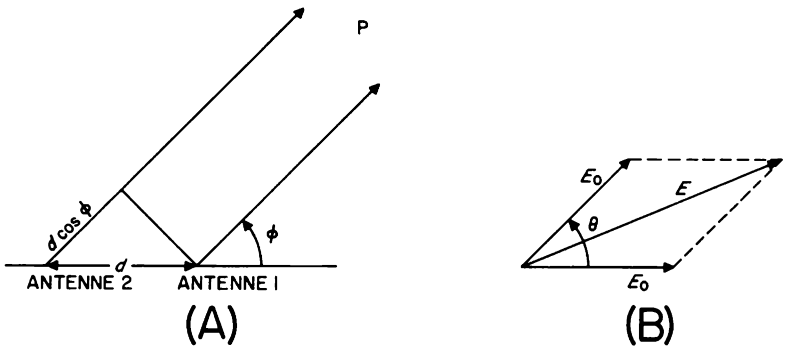
$$E_\theta = j \, \frac{60 \, I_o \, e^{j\omega(t - r/c)}}{r} \, . \, \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta}$$

ANTENNES COLINEAIRES

Deux antennes espacées par une distance d et alimentées par un courant égal produisent des champs électriques dont les intensités E_O sont approximativement égales. La différence des trajets parcourus par les ondes se traduit par un déphasage entre les champs tel que:

$$\frac{\theta}{2\pi} = \frac{d \cos \varphi}{\lambda}$$

$$\theta = \frac{2\pi\, d \cos \varphi}{\lambda}$$



Le champ électrique résultant sera:

$$E^2 = E_O^2 + E_O^2 + 2\, E_O^2 \cos \theta$$

$$= 2\, E_O^2\, (1 + \cos \theta) = 4\, E_O^2 \cos^2 \frac{\theta}{2}$$

En tenant compte de la possibilité d'un déphasage α entre les courants alimentant ces antennes,

$$E^2 = 4\, E_O^2 \cos^2 \left(\frac{\theta + \alpha}{2}\right)$$

$$E = 2\, E_O \cos \left(\frac{\theta + \alpha}{2}\right)$$

Dans le cas de n antennes colinéaires, le champ électrique résultant est:

$$E = E_0 \left[\frac{\sqrt{n}\,\sin\left\{\frac{n\,(\theta + \alpha)}{2}\right\}}{n\,\sin\frac{(\theta + \alpha)}{2}} \right]$$

Les diagrammes de rayonnement obtenus par calcul sont assez proches de ceux qui sont obtenus en pratique.

APPENDICE (IV)

PORTEE D'UNE ANTENNE

Une puissance électrique P_e alimente une antenne d'émission dont le gain est G_t. La densité de puissance p_r mesurée à une distance r de l'antenne est:

$$p_r = \frac{P_e\, G_t}{4\pi r^2}$$

La puissance captée sur un objet réfléchissant dont la surface effective est A_r sera:

$$P_r = \frac{P_e\, G_t \,.\, A_r}{4\pi r^2}$$

Le rapport signal sur bruit $\left(\frac{S}{N}\right)$ du récepteur va permettre de détecter une puissance minimale égale à:

$$P_r = \left(\frac{S}{N}\right) . \left(k\,T\,W\right)$$

La grandeur k T W représente la puissance des bruits: k est la constante de Boltzmann, T la température absolue et W la bande de fréquence du récepteur.

D'où la portée maximale:

$$r = \sqrt{\frac{P_e \,.\, G_t \,.\, A_r}{4\pi\, k\, T\, W \,.\left(\frac{S}{N}\right)}}$$

Remarque: S'il s'agit d'une antenne de radar, la puissance reçue est réfléchie afin d'être recueillie à nouveau à l'antenne. Alors, la puissance captée sera:

$$\frac{\left[\frac{P_e \,.\, G_t \,.\, A_r}{4\pi r^2}\right] \cdot G_r\, \sigma \,.\, A_t}{4\pi r^2} = \frac{P_e\, G_t\, G_r \,.\, A_r \,.\, A_t \sigma}{(4\pi r^2)^2}$$

σ représente un coefficient de réflexion propre à l'objet réfléchissant. G_r est le gain de puissance correspondant. A_t est la surface effective de l'antenne d'émission.

De façon similaire, la portée maximale dépendra du rapport signal sur bruit et de la bande de fréquence des circuits du radar; soit:

$$r = \left[\frac{P_e \cdot G_t \cdot G_r \cdot \sigma \cdot A_t \cdot A_r}{(4\pi)^2 \, k \, T \, W \left(\frac{S}{N}\right)} \right]^{1/4}$$

ou, pour une antenne d'émission paraboloïde:

$$G_t = \frac{4\pi A_t}{\lambda^2}$$

$$r = \left[\frac{P_e \cdot G_r \cdot \sigma \cdot A_t^2 \, A_r}{4\pi k T W . \lambda^2 \left(\frac{S}{N}\right)} \right]^{1/4}$$

QUESTIONNAIRE (I)

1. Calculer la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique:

   — dans le vide (indice de réfraction 1)

   — dans l'air (indice de réfraction 1,01)

   — dans l'eau (indice de réfraction 1,33)

2. Le spectre électromagnétique visible s'étend entre les longueurs d'onde 0,4 et 0,7 micromètres: à quelles fréquences correspondent ces longueurs d'ondes ?

3. Quel serait l'effet de différentes couches d'incides de réfraction variables sur la propagation d'une onde électromagnétique ?

4. On sait que l'indice de réfraction de l'atmosphère diminue lorsque l'on s'élève dans l'atmosphère: quel effet cela implique-t-il quant à la portée maximale d'une transmission en ondes directes ?

5. Quel serait l'effet de couches stratifiées d'indices de réfraction variables dans l'atmosphère sur la trajectoire d'une onde lors d'une inversion atmosphérique ?

6. Quel est le délai moyen dû à la transmission d'un message par réflexion lunaire, la lune étant distante de 384 400 kilomètres de notre planète ?

7. Quelle est la cause prédominante des bruits pour les ondes VHF ?

8. A quelles fréquences l'absorption atmosphérique des ondes électromagnétiques est-elle la plus critique ?

9. Quelles sont les pertes de propagation d'une onde de sol à une distance de 320 km de l'émetteur, si l'émission se fait à la fréquence 2 MHz ?

   — au-dessus du sol ?

   — au-dessus de l'océan ?

   — les 160 premiers kilomètres au-dessus du sol et les 160 derniers kilomètres au-dessus de l'océan ?

10. Peut-on transmettre des ondes VHF par réflexion ionosphérique ?

11. Quelles fréquences sont adéquates pour la transmission dans l'espace ?

12. Comment la portée d'une onde transmise via l'ionosphère varie-t-elle en fonction de la fréquence ou du moment de la journée ?

13. D'où proviennent les variations des conditions de propagation nocturnes et diurnes lors d'une transmission par réflexion ionosphérique ?

14. Comment peut-on surmonter la difficulté impliquée par les variations de portée des ondes de jour et de nuit lors d'une transmission par réflexion ionosphérique ?

15. Quelle est la portée maximale en ondes directes entre des antennes d'émission et de réception situées à des altitudes respectives de 260 m et 180 m ?

16. Pourquoi une émission en modulation d'amplitude (AM) émise à partir du Luxembourg est-elle audible dans la ville de Paris distante de 300 km environ, alors qu'une émission en modulation de fréquence (FM) ne l'est point dans cette même ville ?

17. En supposant qu'une émission en ondes directes à partir de Genève s'effectue à partir d'une antenne haute de 500 mètres, quelle doit être la hauteur de l'antenne située dans la ville de Lyon distante de 100 km environ de Genève de façon à assurer la communication entre ces deux villes ?

18. Qu'est-ce qui provoque du fading ?

QUESTIONNAIRE (II)

1. Si la vitesse de propagation d'une onde de fréquence 20 MHz dans un certain milieu est 0,85 c, sa longueur d'onde dans ce milieu est:

   a) 15 m
   b) 0,06 m
   c) 12,6 m
   d) 17,64 m

2. La puissance de rayonnement électromagnétique:

   a) croît avec la distance à la source de rayonnement
   b) croît avec le carré de la distance à la source de rayonnement
   c) diminue de moitié si la distance à la source de rayonnement double
   d) diminue de 3/4 si la distance à la source de rayonnement double

3. La région de l'espace où se manifeste l'action d'une force s'appelle:

   a) électromagnétisme
   b) champ
   c) domaine
   d) ondes hertziennes

4. Dans l'espace, les lignes de champ magnétiques et électriques voyagent:

   a) parallèlement les unes aux autres
   b) en sens opposés
   c) perpendiculairement les unes aux autres
   d) horizontalement et verticalement respectivement, par rapport au sol.

5. Lorsqu'une onde électromagnétique se propage dans le vide, un seul phénomène peut se produire; lequel ?

   a) absorption
   b) réfraction
   c) diffraction
   d) réflexion

6. Les couleurs que nous percevons se situent strictement dans le spectre électromagnétique entre:

   a) rayons cosmiques et ultraviolets
   b) rayons-X et infrarouges
   c) ondes ultraviolettes et ondes infrarouges
   d) ondes électriques et rayons-X

7. Dans l'atmosphère, quelle est la couche la plus éloignée du sol:

   a) biosphère
   b) stratosphère
   c) ionosphère
   d) troposphère

8. Le type d'onde qui se propage en suivant le relief est appelé:

   a) onde de sol
   b) onde ionosphérique
   c) onde de ciel
   d) onde directe

9. Lequel des modes de propagation suivants est le plus adéquat pour la transmission des hautes fréquences (HF) ?

   a) ondes de sol
   b) ondes directes
   c) réflexion ionosphérique
   d) réflexion troposphérique

10. Quelle est la plus fortement ionisée des couches ionosphériques ?

   a) D
   b) E
   c) F_1
   d) F_2

QUESTIONNAIRE (III)

1. Calculer l'intensité de champ électrique correspondant à une densité de puissance de rayonnement de 1 $\mu W/m^2$.

2. Si une densité de puissance de rayonnement de 1 $\mu W/m^2$ a été mesurée à une distance de 320 km, trouver la puissance rayonnée par l'antenne.

3. L'antenne d'un émetteur irradie 27 watts dans l'espace; quelle serait l'intensité du champ électromagnétique à 320 mètres de celle-ci ?

4. On mesure un champ électromagnétique de 1,44 V/m à 600 mètres de l'antenne d'un émetteur; quelle est la puissance émise par ce dernier ?

5. Quelle est la fréquence de résonance d'une antenne de Hertz dont la longueur est 1 mètre ?

6. Quelle serait la hauteur pratique d'une antenne Marconi pour un poste AM émettant sur 780 kHz ?

7. L'impédance d'entrée d'un dipôle est d'environ ......

8. Une antenne possède une résistance propre de 8 Ω et une résistance de rayonnement de 72 Ω; calculer son coefficient d'efficacité.

9. Calculer la résistance ohmique d'une antenne dont la résistance de rayonnement est 65 Ω et l'efficacité 80%.

10. Une antenne de Hertz horizontale résonnant sur 15 MHz est située à une hauteur de 15 m au-dessus du sol: sachant que son diamètre est 5 mm, trouver sa résistance de rayonnement.

11. Un émetteur de 5 kW émet au moyen d'une antenne dont le coefficient d'efficacité est 0,9 et de gain de puissance 4; quel est le gain de directivité de l'antenne ? Quelle est la puissance de rayonnement effective ?

12. Trouver, en tenant compte de la longueur effective d'une antenne, la longueur d'un dipôle destiné à fonctionner sur 15 MHz.

13. Trouver la longueur d'un dipôle destiné à fonctionner sur 50 MHz, sachant que son diamètre est 6 mm.

14. Calculer la hauteur effective d'une antenne dipôle demi-longueur d'onde, sachant qu'une tension de 10 mV y est induite lorsqu'elle est placée dans un champ électrique d'intensité 12 mV/m. Quelle est la fréquence de résonance de l'antenne ?

15. Comment peut-on faire varier la fréquence de résonance d'une antenne ?

16. Comment le diamètre d'un dipôle influe-t-il sur les propriétés d'antenne ?

17. Le raccord d'une antenne d'émission se fait parfois au moyen de lignes de transmission résonnantes; comment doit-on rectifier la longueur de ces lignes, compte tenu du fait que la vitesse de propagation d'ondes dans les conducteurs électriques est plus basse que dans l'atmosphère ?

18. Quelle différence y a-t-il entre une antenne horizontale et une antenne verticale ?

QUESTIONNAIRE (IV)

1. Une onde électromagnétique peut être produite par:

   a) un aimant et un champ électrostatique
   b) un courant électrique continu
   c) un courant électrique alternatif
   d) un champ électrique et un champ magnétique fixes

2. L'orientation d'une antenne dans l'espace détermine:

   a) la polarisation du champ électrique
   b) la fréquence de résonance
   c) la puissance de rayonnement
   d) la directivité

3. La longueur d'une antenne dépend:

   a) de sa polarisation
   b) de la fréquence utilisée
   c) de la portée d'émission désirée
   d) de la puissance électrique fournie à l'antenne

4. Laquelle des propositions suivantes est vraie:

   a) la polarisation d'une onde est indépendante de la position par rapport au sol de l'antenne qui l'engendre
   b) le sens de propagation du champ électrique émis par l'antenne est parallèle à l'antenne
   c) la polarisation du champ magnétique émis par une antenne verticale est perpendiculaire au sol
   d) la propagation du champ électrique émis par une antenne verticale est omnidirectionnelle

5. Soit le diagramme de radiation d'une antenne dipôle de la figure 2.6A. Sachant qu'à 0° et à 100 km de l'antenne l'on reçoit un signal de 50 μV, trouvez la tension induite qui serait reçue à une distance de 40 km de l'antenne, mais à 60° de la direction de rayonnement maximal de celle-ci.

   a) 50 μV
   b) 40 μV
   c) 30 μV
   d) 20 μV

6. Trouvez l'impédance d'une antenne dont le rapport demi-longueur d'onde diamètre est 250, sachant que la longueur d'antenne est 0,8λ, λ étant la longueur d'onde émise:

   a) 500 Ω
   b) $(500 + j\,800)\ \Omega$
   c) $(500 - j\,800)\ \Omega$
   d) $(500 - j\,1400)\ \Omega$

7. Pour rendre l'antenne de la question précédente résistive, il faut:

a) ajouter une inductance de réactance 800 Ω en parallèle à l'antenne
b) ajouter une seconde antenne identique en parallèle
c) ajouter une capacité de réactance 800 Ω en série à l'antenne
d) ajouter une inductance de réactance 800 Ω en série à l'antenne

8. La puissance de rayonnement effective est:

a) égale au produit de la puissance électrique fournie à l'antenne et du gain de directivité de celle-ci
b) égale au produit de la puissance électrique fournie à l'antenne et du gain de puissance de celle-ci
c) égale au rapport de la puissance électrique fournie à l'antenne et du coefficient d'efficacité de celle-ci
d) égale à la somme de la puissance électrique fournie à l'antenne et la puissance dissipée dans la résistance ohmique de l'antenne

9. Si l'on augmente le courant électrique fourni à une antenne d'émission:

a) l'intensité du champ électrique autour de l'antenne diminue
b) l'intensité du champ électrique autour de l'antenne croît
c) le coefficient d'efficacité d'antenne diminue
d) le gain de directivité de l'antenne augmente

10. Une antenne d'émission:

a) est plus longue qu'une antenne de réception
b) peut aussi servir d'antenne de réception
c) reçoit moins de courant qu'une antenne de réception
d) ne peut servir à l'émission de plus d'une fréquence

QUESTIONNAIRE (V)

1. L'impédance d'entrée du dipôle replié est environ: ________________

2. L'impédance d'entrée du dipôle replié à trois brins est environ: ______

3. Une antenne Yagi utilisant un réflecteur et trois directeurs est destinée à fonctionner sur 27 MHz; calculez les longueurs du dipôle, du réflecteur et des directeurs.

4. On veut construire une antenne Yagi à un réflecteur et trois directeurs fonctionnant sur la fréquence 250 MHz. Trouvez les dimensions de l'antenne.

5. Quelles sont les dimensions d'une antenne rhombique destinée à fournir un angle d'élévation de faisceau de 30° pour une émission sur 9 MHz?

6. Quel est l'avantage des réflecteurs paraboloïdes ?

7. Trouvez la largeur de faisceau ainsi que le gain de puissance maximale d'une antenne à écran réflecteur paraboloïde, sachant que le rapport du diamètre d'antenne à la longueur d'onde émise est 20.

8. Quelles sont les antennes les plus adaptées à l'émission d'ondes MF ?

9. Quelles sont les antennes les plus adaptées aux fréquences HF ?

10. Quelles antennes sont utilisables pour les radio-émissions en modulation de fréquence FM ?

11. Quelles sont les lignes de transmission adaptables aux antennes ?

12. Comment remédier à l'inconvénient des multiples échos électromagnétiques existant en zone urbaine ?

13. Quelles sont les principales causes d'amortissement dans les réseaux de distribution associés à une antenne collective ?

14. Choisir une antenne Yagi pour fréquences FM dans une région où l'intensité de champ atteint 10 mV/m; la tension d'entrée au récepteur devra dépasser 60 mV.

15. Une antenne à écran réflecteur paraboloïde dont le diamètre est 3 m émet sur une fréquence de 5 GHz une puissance de 50 kW. Quelle sera sa largeur de faisceau ? Son gain de puissance ? Son gain de directivité ?

16. Une antenne à cornet dont la surface d'ouverture est 1 m^2 capte un signal transmis par l'antenne de la question 15; sachant que les deux antennes sont distantes de 250 km, quelle est la puissance reçue par l'antenne à cornet ?

17. Une antenne à boucle est située dans une région où l'intensité de champ d'une émission sur 400 kHz est 100 mV/m; l'antenne a une surface de boucle de 15 cm^2 et son nombre de spires est 50. Calculez la tension maximale induite dans l'antenne.

18. Quelle est l'atténuation maximale due aux raccordements de câbles tels qu'ils sont présentés à la figure 2.73, sachant que la longueur des câbles est 35 m ?

QUESTIONNAIRE (VI)

1. Laquelle des antennes suivantes n'est pas omnidirectionnelle ?

   a) l'antenne Marconi
   b) l'antenne de Hertz
   c) l'antenne discône
   d) l'antenne log-périodique

2. Laquelle des antennes suivantes n'est pas résonnante ?

   a) le dipôle replié
   b) l'antenne rhombique
   c) l'antenne de Hertz
   d) l'antenne colinéaire

3. Laquelle des antennes suivantes peut servir à la réception HF ?

   a) l'antenne à boucle
   b) l'antenne à cadre carré
   c) l'antenne log-périodique
   d) l'antenne discône

4. Laquelle des antennes suivantes ne convient pas à la réception TV ?

   a) l'antenne dipôle
   b) l'antenne Yagi
   c) l'antenne rhombique
   d) les groupements d'antenne

5. Dans le cas d'interférences dans un récepteur de télévision disposant d'une antenne intérieure, il faut:

   a) changer l'antenne
   b) mieux orienter l'antenne
   c) choisir une antenne de plus faible directivité
   d) changer l'impédance d'entrée du récepteur

6. Dans une antenne Yagi:

   a) le réflecteur est branché à la ligne de transmission
   b) le directeur est branché à la ligne de transmission
   c) tous les éléments parasites sont branchés à la ligne de transmission
   d) aucun des éléments parasites n'est branché à la ligne de transmission

7. Laquelle des antennes suivantes est polarisée circulairement ?

   a) l'antenne hélicoïdale
   b) l'antenne à boucle
   c) l'antenne à écran réflecteur parabolique
   d) l'antenne à alimentation Cassegrain.

8. L'antenne hélicoïdale est souvent utilisée pour la communication avec les satellites à cause de:

   a) la super-réfraction
   b) la réfraction ionosphérique
   c) la dispersion troposphérique
   d) l'effet Faraday

9. Une antenne à écran réflecteur parabolique de très grand diamètre:

   a) peut servir d'antenne multi-ondes
   b) permet une plus grande directivité
   c) a les caractéristiques d'une antenne isotropique
   d) est construite pour opérer en basses fréquences

10. Une tour d'antenne très haute:

   a) permet d'irradier de plus basses fréquences
   b) est en fait une antenne Marconi
   c) ne sert qu'à la communication en basses fréquences
   d) sert à placer l'antenne à un endroit plus élevé

RÉPONSES AU QUESTIONNAIRE (I)

1. Utilisant la formule (1.1), nous obtenons respectivement:

   3.10^8 m/s, $2{,}97 \times 10^8$ m/s, $2{,}25 \times 10^8$ m/s.

2. D'après (1-7), la bande de fréquences du spectre visible s'étend de 428,5 THz à 750 THz.

3. L'effet des dites couches sera de faire varier la vitesse de propagation de l'onde d'une part, et de provoquer la courbure de l'onde de l'autre.

4. Une portée maximale effective plus grande car la propagation ne se fera pas en ligne droite, mais suivra la courbure de la terre.

5. La super-réfraction, c'est-à-dire l'emprisonnement d'une onde entre une certaine couche atmosphérique et la terre, ou même entre deux couches atmosphériques situées à des hauteurs différentes.

6. Le temps requis pour parcourir la distance terre-lune, puis lune-terre est:

$$\frac{2 \times 384\,400}{c} = \frac{2 \times 384\,400}{300\,000} = 2{,}56 \text{ secondes}$$

7. Les bruits industriels, en zone urbaine surtout (voir fig. 1.11).

8. Les fréquences 60 et 120 GHz dont l'absorption est due à l'oxygène de l'air, ainsi que les fréquences 23 et 180 GHz dont l'absorption est due à la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère (fig. 1.12).

9. Au-dessus du sol, les pertes de propagation atteindraient 147 dB, alors qu'elles n'atteindraient que 90 dB au-dessus de l'océan (fig. 1.14).

   Si l'émission se fait d'abord au-dessus du sol, les pertes atteindront 124 dB lors des premiers 160 km; entre les premiers 160 km et les seconds, les pertes au-dessus de l'océan sont de 10 dB; les pertes totales atteindront donc 134 dB.

10. Non, car les fréquences VHF sont supérieures à la fréquence critique, soit 30 MHz.

11. Les fréquences supérieures à la fréquence critique; de fait, on utilisera des ondes SHF et EHF vu leur plus haute énergie et donc leur plus grande portée.

12. La portée d'une onde transmise via l'ionosphère augmente la nuit vu que les couches D et E de l'ionosphère disparaissent pratiquement; la portée de l'émission augmente avec la fréquence tant que celle-ci reste inférieure à la fréquence critique (fig. 1.17 et 1.18).

13. L'activité solaire fait que la densité d'ions est beaucoup plus grande en basse altitude le jour, d'où la variation des hauteurs des différentes couches ionosphériques et en conséquence, une influence sur la portée des émissions.

14. En utilisant deux fréquences différentes le jour et la nuit: par exemple, une onde de fréquence 12 MHz qui sera réfléchie en journée par la couche E et une onde de fréquence 10 MHz qui sera réfléchie par la couche F la nuit.

15. Appliquant (1-10), nous obtenons une portée de 105,6 kilomètres.

16. La radio-émission en modulation d'amplitude (AM) se fait entre ondes moyennes MF (entre 525 kHz et 1605 kHz) et le mode de propagation le plus adéquat est donc l'émission en onde de sol dont la portée peut atteindre des centaines de kilomètres en MF.

    La radio-émission en modulation de fréquence (FM) se fait entre hautes fréquences VHF (entre 88 MHz et 104 MHz) et le mode de propagation le plus approprié est l'émission en ondes directes qui nécessitent une vue directe entre l'émetteur et le récepteur et dont la portée est par conséquent limitée vu la sphéricité de la terre.

17. Utilisant la relation (1-10):

$$d = \sqrt{2h_t R} + \sqrt{2h_r R}$$

d'où:

$$h_r = \frac{(d - \sqrt{2h_t R})^2}{2R}$$

$$= 31{,}2 \text{ m}$$

18. Lorsque deux ou plusieurs ondes se rejoignent, leur somme peut être une onde plus ou moins importante selon leurs phases respectives; il peut y avoir évanouissement en ondes d'espace, lorsqu'à l'antenne de réception se croisent une onde directe et une onde réfléchie par le sol; de même, en émission par réflexion ionosphérique, une même onde peut être réfléchie par deux couches ionosphériques différentes causant ainsi un évanouissement de l'onde.

RÉPONSES AU QUESTIONNAIRE (II)

1c	2d	3b	4c	5c	6c	7c	8a	9c	10d

RÉPONSES AU QUESTIONNAIRE (III)

1. D'après (2-1) nous aurons une intensité de champ électrique égale à 19,4 mV/m.

2. 1 MW (voir figure 2-4).

3. D'après (1-4) la densité de puissance à une distance de 320 mètres de l'émetteur est 20,9 $\mu W/m^2$ soit, utilisant (2-1), une intensité de champ électrique correspondante 88,9 mV/m.

4. Combinant (2-1) et (1-4), nous obtenons 24,88 kW.

5. La longueur d'onde correspondante est 2 mètres, soit une fréquence 150 MHz.

6. La longueur d'onde correspondante est 384,6 m; la longueur de l'antenne Marconi sera le quart de celle-ci, soit 96,15 m.

7. 73 Ω.

8. D'après (2-4) l'efficacité de l'antenne est 90% .

9. 16,25 Ω.

10. Le rapport demi-longueur d'onde-diamètre étant $\lambda/2d = 2000$, la résistance de rayonnement est d'environ 63 Ω (tableau 1). L'antenne est située à 20 m, soit une longueur d'onde au-dessus du sol; selon la figure 2.21, la résistance de rayonnement serait de 70 Ω pour une antenne dont la résistance de rayonnement est 73 Ω; dans notre cas, nous aurons:

$$63 \times \frac{70}{73} = 60{,}4\ \Omega$$

11. D'après (2-6), le gain de directivité est 4/0,9 = 4,44; la puissance de rayonnement effective sera: $4 \times 5 \times 10^3 = 20$ kW.

12. D'après (2-7), $\lambda_e = \frac{3.10^8}{15.10^6} = 0{,}94 = 18{,}8$ m; la longueur d'antenne sera donc 9,4 m.

13. Le rapport demi-longueur d'onde-diamètre est:

$$\frac{\lambda}{2d} = \frac{6}{2\,.\,6\,.\,10^{-3}} = 500$$

Le coefficient de raccourcissement donné par la figure 2-26 est 0,97; d'où la longueur du dipôle: $0{,}97 \times 3 = 2{,}91$ m.

14. Utilisant (2-10), nous aurons: $h_e = \dfrac{10^{-2}}{12 \cdot 10^{-3}} = 0{,}83$ m.

Utilisant (2-9), la longueur d'onde de résonance est 0,83 x π = 2,6 m correspondant à une fréquence de résonance 114,5 MHz.

15. En plaçant en série à l'antenne un élément réactif: ajouter une inductance en série à l'antenne revient à baisser sa fréquence de résonance, tandis qu'ajouter une capacité en série à l'antenne revient à élever sa fréquence de résonance.

16. Le diamètre d'une antenne dipôle influe sur la longueur effective de celle-ci, au-dessus de 30 MHz (fig. 2-26), ainsi que sur sa résistance de rayonnement (tableau 1); de plus, la bande passante d'une antenne dipôle augmente avec le diamètre de celle-ci.

17. De même que les antennes, les lignes de transmission devront être construites légèrement plus courtes (d'environ 6%) que leur longueur de résonance; des tables spécialisées donnent les facteurs de raccourcissement correspondant aux différents matériaux utilisés pour les lignes de transmission.

18. La polarisation de l'onde émise; la polarisation horizontale impliquera le besoin d'une antenne de réception horizontale et la polarisation verticale celui d'une antenne de réception verticale.

RÉPONSES AU QUESTIONNAIRE (IV)

1c, 2a, 3b, 4d, 5a, 6b, 7c, 8b, 9b, 10b

RÉPONSES AU QUESTIONNAIRE (V)

1. 292 Ω.

2. 657 Ω.

3. La longueur du dipôle sera: $0{,}94 \times \frac{\lambda}{2} = 5{,}22$ m.

   La longueur du réflecteur sera: $5{,}22 \times 1{,}05 = 5{,}48$ m.

   La longueur des directeurs sera: $5{,}22 \times 0{,}96 = 5{,}01$ m.

4. D'après le tableau 5, le dipôle principal aura une longueur de $64{,}6$ cm $- 30 \times 0{,}31 = 55{,}3$ cm; les éléments parasites auront les longueurs suivantes:

   le réflecteur: $67{,}9 - 30 \times 0{,}31 = 58{,}6$ cm

   le premier directeur: $61{,}2 - 30 \times 0{,}31 = 51{,}9$ cm

   le second directeur: $60{,}9 - 30 \times 0{,}31 = 51{,}6$ cm

   le troisième directeur: $60{,}6 - 30 \times 0{,}31 = 51{,}3$ cm

   la distance entre les différents éléments de l'antenne sera $0{,}2\lambda$, soit 0,24 cm.

5. D'après les diagrammes 2-50A et 2-50B, nous aurons pour $L \times \lambda$, un angle d'ouverture $\phi = 41°$, les câbles étant disposés à une hauteur $1{,}4\lambda$ ou $1{,}6\lambda$ au-dessus du sol, soit 46,6 m ou 53,3 m.

6. Concentrer l'émission électromagnétique en un faisceau de grande directivité; l'antenne à écran réflecteur paraboloïde ainsi que l'antenne à cornet sont utilisées pour les communications SHF et EHF.

7. Utilisant 2-12 et 2-13, nous obtenons une largeur de faisceau de 3,5° et un gain de directivité maximal 2400.

8. Les antennes Marconi le plus souvent.

9. L'antenne rhombique (qui est assez encombrante vu sa dimension) et l'antenne log-périodique.

10. Les radio-émissions en modulation de fréquence se font en VHF; s'y adaptent l'antenne dipôle, ou le dipôle replié (à plusieurs brins ou à section non uniforme), l'antenne bicône, les différents groupements d'antennes, les antennes Yagi, l'antenne discône et l'antenne log-périodique.

11. Deux fils électriques parallèles ou torsadés, le câble bifilaire plat et le câble coaxial.

12. En utilisant une antenne orientable que l'on situera expérimentalement jusqu'à l'obtention d'une réception satisfaisante.

13. Les pertes de câbles ainsi que celles des boîtes de distribution.

14. La fréquence moyenne est $\frac{(88 + 108)}{2} \times 10^6 = 98$ MHz soit une longueur d'onde 3,06 m.

La hauteur effective de l'antenne est:

$$h_e = \frac{60 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-3}} = 6 \text{ m}$$

L'antenne aura pour gain de puissance (d'après 2-11):

$$G = \frac{6 \times \pi}{3,06} = 6,15$$

Une antenne Yagi à trois directeurs et un réflecteur conviendrait (voir figure 2-40A).

15. La longueur d'onde émise est:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.10^8}{5.10^9} = 6 \text{ cm}$$

d'où l'angle d'ouverture (d'après 2-12):

$$\phi = \frac{70 \times 6 \times 10^{-2}}{3} = 1,4°$$

Le gain de directivité et le gain de puissance sont identiques pour les fréquences EHF et SHF soit, d'après (2-13):

$$G = 6 \left(\frac{3}{6 \times 10^{-2}}\right)^2 = 15\,000$$

16. La puissance de rayonnement de l'antenne émettrice est:

$$P_t = P_e = 50\ \text{kW}$$

La densité de puissance de rayonnement à une distance de 250 km de l'antenne émettrice dans la direction du lobe principal est:

$$p_r = \frac{P_e G}{4\pi d^2} = \frac{750 \times 10^6}{4\pi \,.\, (250 \times 10^3)^2} = 0{,}95\ \text{mW/m}^2$$

La puissance de rayonnement captée sera:

$$P_r = p_r \times A = 0{,}95 \times 10^{-3} \times 1 = 0{,}95\ \text{mW}$$

En tenant compte de l'atténuation atmosphérique de 0,0123 dB/km (fig. 1.12) soit: 0,0123 x 250 = 3,075 dB, la puissance captée sera: 0,46 mW.

17. En supposant l'antenne à boucle convenablement orientée, la tension induite sera (2-17):

$$v = 2\pi \times 100 \times 10^{-3} \times 50 \times \frac{15 \times 10^{-4}}{750} = 62{,}8\ \mu\text{V}$$

18.

2 boîtes à deux dérivations	8 dB
2 boîtes de jonction	2 dB
35 m de câble	5,25 dB
Au total	15,25 dB

RÉPONSES AU QUESTIONNAIRE (VI)

1d, 2b, 3c, 4c, 5b, 6d, 7a, 8d, 9b, 10d

LEXIQUE FRANCAIS - ANGLAIS

absorption atmosphérique	atmospheric absorption
alimentation Cassegrain	Cassegrain feed
alimentation directe	direct coupled antenna
alimentation d'une antenne	antenna feed
angle limite	critical angle
angle d'élévation de faisceau	vertical angle of radiation
angle de réflexion	angle of reflection
angle d'incidence	angle of incidence
antenne	antenna or aerial
antenne à boucle	loop antenna
antenne à cornet	horn antenna
antenne à écran réflecteur paraboloïde	parabolic aerial
antenne à lentille	lens antenna
antenne bicône	conical dipole (or cage type dipole)
antenne colinéaire	colinear aerial
antenne collective	commun antenna
antenne de Hertz	Hertz antenna
antenne d'émission	transmitting antenna
antenne de réception	receiving antenna
antenne discône	discone antenna
antenne en nappe	top loaded antenna
antenne hélicoïdale	helical antenna
antenne intérieure	indoor antenna
antenne log-périodique	log-periodic antenna
antenne Marconi	Marconi antenna
antenne non résonnante	non resonant antenna
antenne résonnante	resonant antenna
antenne rhombique	Rhombic aerial
antenne Yagi	Yagi array
bande passante	bandwidth
boîte de distribution	multiset coupler
bruit blanc	white noise
bruits électriques	internal noise
bruits électromagnétiques	external noise
câble bifilaire blindé	shielded twin lead
câble bifilaire plat	flat twin lead
câble coaxial	coaxial cable
champ électrique	electric field
champ magnétique	magnetic field
coefficient d'efficacité d'une antenne	antenna efficiency
couche ionosphérique	ionospheric layer

densité de puissance de rayonnement	radiated power density
diagramme de rayonnement	radiation pattern or radiation polar diagram
diffraction	diffraction
dipôle élémentaire	elementary dipole
dipôle replié	folded dipole
dipôle replié à plusieurs brins	dipole with many elements
dipôle replié à section non uniforme	dipole with large diameter elements
directeur	director
dispersion troposphérique	tropospheric scattered waves
effet Faraday	Faraday effect
élément passif (parasite)	parasitic element
évanouissement d'onde	fading
fréquence critique	critical frequency
fréquence d'une onde	wave frequency
gain de directivité	directive gain
gain en puissance	power gain
groupement d'antennes alimentées en quadrature	end fire aerial
groupement d'antennes parallèles	broadside aerial
guide d'ondes	wave guide
harmoniques	harmonics
hauban	guy
hauteur effective	effective height
impédance d'antenne	antenna impedance
indice de réfraction	refractive index
inversion de température	temperature inversion
ionosphère	ionosphere
largeur de faisceau	beamwidth
laser	laser
lignes de champ	lines of force
lignes de transmission	transmission lines
longueur d'onde	wavelength
longueur effective	effective lenght
maser	maser
mat d'antenne	antenna mast
mesureur de champ	field strength measurer

onde cohérente	coherent wave
onde électromagnétique	electromagnetic wave
ondes de sol	ground waves
ondes directes	direct waves
ondes transmises par réflexion ionosphérique	sky-waves
période d'une onde	wave period
puissance électromagnétique	electromagnetic power
réflecteur	reflector
réflexion	reflection
réfraction	refraction
résistance de rayonnement	radiation resistance
saut	skip distance
spectre électromagnétique	electromagnetic spectra
stratosphère	stratosphere
superréfraction	superrefraction or ducting
tour d'antenne	antenna tower
troposphère	troposphere
zone de silence	zone of silence

Achevé d'imprimer par Dumas, 42100 Saint-Étienne (Loire)
Dépôt légal : octobre 1982
Dépôt légal de la 1re édition : 3e trimestre 1980
Imprimeur n° 25936
Imprimé en France

MODULES TECCART

deux séries

- COMMUNICATIONS par D. Bensoussan
- SEMI-CONDUCTEURS par V. Ramirez

dans ce module

A chaque usage son antenne, en émission comme en réception d'ondes hertziennes.

Les différents mécanismes de rayonnement des antennes, leurs caractéristiques, quelques principes d'installation sont ici présentés pour les étudiants et les techniciens concernés par ce domaine.

au sommaire

1. Les ondes électromagnétiques *(conditions générales, modes de propagation).*
2. Les antennes *(principe, paramètres, différents modèles d'antennes, installation).*

   Appendices : théorie des champs, lois de Maxwell, calculs relatifs aux antennes, portée.

Atelier Michel Molino

9 782040 120849

ISBN 2-04-012084-X

F47/82-1